
Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern unter dynamischen Bedingungen

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Bastian Walter Zydek
geboren am 08.08.1982
in Mainz

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann

Tag der Einreichung: 22.04.2014
Tag der mündlichen Prüfung: 18.07.2014

D17
Darmstadt 2014

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Für das Zustandekommen und für die Betreuung dieser Arbeit bin ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh zu großem Dank verpflichtet. Herr Khanh hat mich in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und auch schon zuvor als Student immer vorbildlich und intensiv betreut, wobei mir immer der nötige Freiraum gegeben wurde, die fachlichen Themen und die Herangehensweise an Problemstellungen selbst zu gestalten.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann für sein Interesse an der Arbeit, der Annahme des Korreferats und der damit verbundenen Investition seiner Zeit.

Die vorliegende Arbeit besteht aus einigen Probandenstudien und einer Umfrage. Ich möchte mich hiermit bei allen Kollegen, Studenten, Hiwis und Studien- bzw. Umfrageteilnehmern für die Unterstützung bedanken.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Kollegen Nils Haferkemper, Christoph Schiller und Holger Sprute für die vielen fachlichen Diskussionen und Anregungen als auch für ihre große Hilfsbereitschaft.

Mein tief empfundener Dank gilt meiner Lebensgefährtin Claudia, meinen Eltern, meiner Familie und den Eltern meiner Lebensgefährtin für die immerwährende Unterstützung.

Bad Soden, den 21. Juli 2014

Bastian Walter Zydek

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	VIII
Zusammenfassung	1
1 Einleitung, Motivation und Aufbau.....	3
1.1 Wahrnehmung der Blendung im Straßenverkehr	4
1.2 Dynamische Feldtests hinsichtlich Blendung und Detektionsdistanz	4
1.2.1 Charakterisierung von blendfreiem Fernlicht.....	5
1.2.2 Einfluss der Beladung auf die Blendung.....	5
1.3 Spektrale Empfindlichkeit von physiologischer Blendung.....	6
2 Grundlagen	7
2.1 Blendung.....	7
2.1.1 Arten von Blendung.....	7
2.1.2 Physiologische Blendung	8
2.1.3 Psychologische Blendung.....	10
2.2 Scheinwerfertechnologien	11
2.2.1 Lampenarten und optische Konzepte.....	11
2.2.2 Adaptive Frontbeleuchtungssysteme	14
3 Umfrage: Relevanz von Blendung im Straßenverkehr.....	19
3.1 Einleitung	19
3.2 Methodik.....	19
3.3 Ergebnisse.....	20
3.3.1 Charakterisierung der Teilnehmer	20
3.3.2 Fahrzeuge und Scheinwerfer der Teilnehmer	22
3.3.3 Wahrnehmung von Dunkelheitsfahrten	24
3.3.4 Wahrnehmung von Blendung	27
3.3.5 Gefahrensituationen durch Blendung.....	32
3.4 Fazit	33
4 Blendung und Detektionsdistanz von blendfreiem Fernlicht	35
4.1 Einleitung	35
4.2 Stand der Forschung.....	35
4.3 Methodik.....	39
4.3.1 Physiologische Blendung	41
4.3.2 Psychologische Blendung.....	43
4.3.3 Detektionsdistanz	43
4.3.4 Probanden und Bewertungen	44
4.4 Ergebnisse.....	45
4.4.1 Psychologische Blendung.....	45
4.4.2 Physiologische Blendung	45

4.4.3	Photometrische Ergebnisse	48
4.4.4	Detektionsdistanz	49
4.4.5	Signifikanzanalyse	50
4.5	Fazit	50
4.6	Abgeleitete Erkenntnisse.....	51
4.6.1	Ableitung einer Abblenddistanz: Vergleich mit der Arbeit von SPRUTE [20]	51
4.6.2	Vergleich mit der Arbeit von HOLLADAY [19] zur physiologischen Blendung.....	53
4.6.3	Vergleich von physiologischer und psychologischer Blendung.....	55
5	Einfluss der Fahrzeugbeladung auf die Blendung.....	58
5.1	Einleitung	58
5.2	Methodik.....	58
5.2.1	Versuchsaufbau, Probanden und Ablauf	58
5.2.2	Photometrische Messungen.....	60
5.3	Ergebnisse.....	60
5.3.1	Vergleich der Bewertungen von Fahrer und Beifahrer	61
5.3.2	Stabilität der de Boer Bewertungen	61
5.3.3	Abhängigkeit der de Boer Bewertungen von der Beladung	62
5.3.4	Abhängigkeit der de Boer Bewertungen von dem Nickwinkel der HDG.....	62
5.3.5	Vergleich der de Boer Bewertungen von Halogen-, Xenon- und LED-Scheinwerfern.....	63
5.3.6	Photometrische Auswertung.....	65
5.4	Abhängigkeit der Feldtestergebnisse von Probandeneigenschaften	72
5.5	Fazit	73
6	Laboruntersuchung zur spektralen physiologischen Blendung	75
6.1	Einleitung	75
6.2	Methodik.....	76
6.3	Ergebnisse.....	80
6.4	Fazit	86
7	Kritik und Ausblick	88
	Literaturverzeichnis	91
	Anhang.....	99
	Onlinefragebogen	99
	Veröffentlichungen und betreute Arbeiten.....	111
	Lebenslauf	113
	Erklärung laut §9 der Promotionsordnung	114

Abkürzungsverzeichnis

AFS	A daptives F rontbeleuchtungssystem
aHDG	A daptive H ell- D unkel- G renze
ATZ	A utomobiltechnische Z eitschrift
CCS	Konstantstromquelle (engl. „constant current source“)
CIE	C ommission I nternationale de l'Éclairage
ECE	Wirtschaftskommission für Europa (engl. „Economic Commission for Europe“)
GLW	G leitende L euchtweite
GTB	G roupe de T ravail de B ruzelles
HAL	H alogen
HDG	H ell- D unkel- G renze
HID	Xenon (engl. „high intensity discharge“)
HUD	H ead- U p- D isplay
I.E.S.	I lluminating E ngineering S ociety
ILV	I nternational L ighting V ocabulary
ISAL	I nternational S ymposium on A utomotive L ighting
LCTF	Einstellbarer Flüssigkeitskristallfilter (engl. „liquid crystal tunable filter“)
LED	Leuchtdiode (engl. „light-emitting diode“)
LIDAR	L ight d etection and r anging
LWR	L euchtweitenregelung
OLED	Organische Leuchtdiode (engl. „organic light-emitting diode“)
SW	S cheinwerfer
UV	U ltraviolett
μC	M ikrocontroller

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: De Boer Skala [25].....	10
Tabelle 2.2: Kenngrößen von Halogen- und Xenonlampen (Quelle: Philips).....	12
Tabelle 4.1: Detektionsdistanzen nach BÖHM et al. [56].....	38
Tabelle 4.2: Probanden und Bewertungen.....	44
Tabelle 4.3: Anzahl der durchgeführten Fahrten.....	45
Tabelle 4.4: Angepasste Parameter k, n und Maßzahlen zur Beurteilung der Funktionsanpassungen.....	54
Tabelle 4.5: Angepasste Parameter und Maßzahlen zur Beurteilung der Funktionsanpassung.....	57
Tabelle 5.1: Beladungszustände, Fahrzeuge und Durchläufe (ohne Kalibrierfahrzeug).....	59
Tabelle 5.2: Stabilität der de Boer Bewertungen.....	61
Tabelle 5.3: Mittlere physiologische Blendung, Standardabweichung, Durchläufe.....	64
Tabelle 5.4: Maßzahlen zur Beurteilung der S-Funktion Anpassungen.....	68
Tabelle 6.1: Relative spektrale Empfindlichkeit der physiologischen Blendung.....	82
Tabelle 6.2: Blendung von HAL, HID, LED_1, LED_2 und LED_3 nach PHB(λ).....	83

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Asymmetrisches Abblendlicht und Fernlicht	3
Abbildung 1.2: Blendfreies Fernlicht und Markierungslicht.....	4
Abbildung 2.1: Entstehungsbereiche von Streulicht im Auge nach SCHMIDT-CLAUSEN [20]	8
Abbildung 2.2: Fragebogen mit de Boer Skala	11
Abbildung 2.3: Lichtverteilung Halogen- (links) und Xenonscheinwerfer (rechts) (Quelle: Hella).....	12
Abbildung 2.4: Audi A8 Matrix Beam Scheinwerfer (Quelle: Audi)	13
Abbildung 2.5: Projektionsmodul mit Blende (links) und Freiformwalze (rechts) (Quelle: Hella).....	14
Abbildung 2.6: Halogen Reflexionsscheinwerfer mit Freiformreflektoren (Quelle: Hella)	14
Abbildung 2.7: Gleitende Leuchtweite (Quelle: Hella).....	15
Abbildung 2.8: Dynamisches (links) und statisches Kurvenlicht (rechts) (Quelle: Hella)	16
Abbildung 2.9: Asymmetrisches Abblendlicht und blendfreies Fernlicht.....	17
Abbildung 2.10: Arten von blendfreiem Fernlicht	17
Abbildung 3.1: Fragetypen	20
Abbildung 3.2: Histogramm der Altersverteilung der Umfrageteilnehmer [A001]	21
Abbildung 3.3: Jahresfahrleistung [A101]	21
Abbildung 3.4: Jahresfahrleistung in Abhängigkeit des Alters [A101]&[A001]	21
Abbildung 3.5: Hauptsächlicher Fahrzeugtyp [A201]	22
Abbildung 3.6: Lampentyp [A202].....	22
Abbildung 3.7: Zufriedenheit Lampentyp [A208]&[A202].....	22
Abbildung 3.8: Lichtassistenzsysteme [A203]	23
Abbildung 3.9: Zufriedenheit Lichtassistenzsysteme [A209].....	23
Abbildung 3.10: Aufpreis für bessere Sicht bei Nachtfahrten [A206]	23
Abbildung 3.11: Häufigkeit der Scheinwerfereinstellung [A207].....	24
Abbildung 3.12: Häufigkeit von Dunkelheitsfahrten [A103]	24
Abbildung 3.13: Dunkelheitsfahrten in Abhängigkeit des Alters [A103]&[A001].....	25
Abbildung 3.14: Am meisten befahrener Straßentyp bei Dunkelheitsfahrten [A104]	25
Abbildung 3.15: Umfrageteilnehmer, die gerne in Dunkelheit fahren [A105]&[A202].....	25
Abbildung 3.16: Gerne in Dunkelheit Fahrende in Abhängigkeit des Geschlechts [A105]&[A002].....	26
Abbildung 3.17: Wunsch nach besserer Sicht bei Dunkelheitsfahrten [A106]	26
Abbildung 3.18: Gerne in Dunkelheit Fahrende in Abhängigkeit des Alters [A105]&[A001].....	26
Abbildung 3.19: Stressvervielfältigung bei Dunkelheitsfahrten [A107]	27
Abbildung 3.20: Häufigkeit von Störfaktoren [A114]	27
Abbildung 3.21: Häufigkeit von Blendung [A333].....	28
Abbildung 3.22: Häufigkeit von Blendung in Abhängigkeit des Geschlechts [A333]&[A002]	28
Abbildung 3.23: Häufigkeit von Blendung in Abhängigkeit des Alters [A333]&[A001].....	28
Abbildung 3.24: Häufigkeit von eintretenden Störfaktoren durch Blendung [A322]	29
Abbildung 3.25: Am ehesten assoziierte Wirkung von Blendung [A316]	29
Abbildung 3.26: Häufigkeit von Blendung in Abhängigkeit der Verkehrsteilnahme [A330]	29
Abbildung 3.27: Am ehesten mit Blendung assoziierter Lampentyp [A304].....	30
Abbildung 3.28: Am ehesten mit Blendung assoziierte Farbe [A303]	30
Abbildung 3.29: Verhalten hochmoderner Scheinwerfer bezüglich Blendung Anderer [A319]	30
Abbildung 3.30: Häufigkeit von Blendung in Abhängigkeit der Verkehrsdichte [A329]	31
Abbildung 3.31: Häufigkeit von Blendung in Abhängigkeit der Verkehrssituation [A323].....	31

Abbildung 3.32: Häufigkeit von Gegenverkehrsblendung nach Straßentyp [A324]	31
Abbildung 3.33: Häufigkeit von Folgeverkehrsblendung nach Straßentyp [A331]	31
Abbildung 3.34: Am ehesten mit Blendung assoziierter Witterungstyp [A332]	32
Abbildung 3.35: Häufigkeit von gefährlichen Situationen durch Blendung [A310]	32
Abbildung 3.36: Häufigkeit von definierten Gefahrensituationen durch Blendung [A312]	33
Abbildung 4.1: Ableitung der Abblendentfernung aus dem Schwellenkontrast [20]	36
Abbildung 4.2: Runway des August-Euler-Flugplatzes	39
Abbildung 4.3: Testaufbau des Feldtests auf dem August-Euler-Flugplatz	40
Abbildung 4.4: Blendung durch Fernlicht und Positionierung der statischen Fahrzeuge	41
Abbildung 4.5: Aufbau zur Bestimmung der physiologischen Blendung	42
Abbildung 4.6: Aufnahme des dynamischen Schwellenkontrastes während eines Durchlaufs	42
Abbildung 4.7: Fragebogen zur Bewertung der psychologischen Blendung der Testfahrzeuge	43
Abbildung 4.8: Leuchtdichteaufnahmen der Detektionsobjekte	44
Abbildung 4.9: Psychologische Blendung: Mittelwerte	45
Abbildung 4.10: Schwellenkontrast HAL Fern- und Abblendlicht (Fahrerposition)	46
Abbildung 4.11: Schwellenkontrast HAL Fern- und Abblendlicht (Fahrer- & Beifahrerposition)	46
Abbildung 4.12: Physiologische Blendung von Fahrer und Beifahrer (HID Testfahrzeug)	47
Abbildung 4.13: Mittlerer Schwellenkontrast	47
Abbildung 4.14: Mittlere Schwellenkontrastverläufe	48
Abbildung 4.15: Mittlere Beleuchtungsstärke und mittlere Maximalbeleuchtungsstärke	48
Abbildung 4.16: Mittlere Beleuchtungsstärke bei 50 m	49
Abbildung 4.17: Mittlere Detektionsdistanz für alle Lichtfunktionen	49
Abbildung 4.18: Abblendentfernung für HAL und HID Fernlicht	52
Abbildung 4.19: Vergleich der angepassten Daten mit den Feldtestdaten	54
Abbildung 4.20: Abhängigkeit der Schwellenleuchtdichtedifferenz von θ_B und Ev_B	55
Abbildung 4.21: Psychologische zu physiologische Blendung	56
Abbildung 4.22: Vergleich: Fit zu Realdaten	56
Abbildung 5.1: Statische Probandenfahrzeuge (Quelle: T. Küppers)	59
Abbildung 5.2: Blendungsbewertung eines Probanden (Quelle: T. Küppers)	59
Abbildung 5.3: Photometrisches Messequipment (Quelle: T. Küppers)	60
Abbildung 5.4: Mittlere psychologische Blendung von Fahrer und Beifahrer	61
Abbildung 5.5: Mittlere psychologische Blendung in Abhängigkeit von der Beladung	62
Abbildung 5.6: Nickwinkel der einzelnen Fahrzeuge (Balken) für 50% und 100% Beladung	62
Abbildung 5.7: Mittlere psychologische Blendung in Abhängigkeit von dem Nickwinkel	63
Abbildung 5.8: Mittlere psychologische Blendung in Abhängigkeit von Nickwinkel und Lampenart	63
Abbildung 5.9: Mittlere psychologische Blendung (keine Beladung)	64
Abbildung 5.10: Flächenauswahl zur Auswertung der Leuchtdichte von Scheinwerfern	65
Abbildung 5.11: Blendender Bereich einer Leuchtdichteverteilung	66
Abbildung 5.12: Sigmoid- oder S-Funktion	66
Abbildung 5.13: Angepasste S-Funktionen der photometrischen Größen	68
Abbildung 5.14: Vergleich der mittleren Beleuchtungsstärke mit SIVAK et. al. und Feldtest Kapitel 4	69
Abbildung 5.15: Vergleich der maximalen Leuchtdichte mit RAPHAEL	70
Abbildung 5.16: Verhalten von Ev_{mit} und Lv_{max} in Abhängigkeit des Nickwinkels	71
Abbildung 5.17: Verhalten von Ev_{mit} und Lv_{max} in Abhängigkeit des Nickwinkels und Lampenart	71
Abbildung 5.18: Verhalten von Ev_{mit} zu Lv_{max}	72
Abbildung 5.19: Mittlere psychologische Blendung in Abhängigkeit des Alters	72

Abbildung 5.20: Mittlere psychologische Blendung in Abhängigkeit der Sehhilfe	73
Abbildung 6.1: Schematische Darstellung und Geometrie der Sehaufgabe	76
Abbildung 6.2: Sehaufgabe ohne und mit Blendung (zu Darstellungszwecken alle Objekte leuchtend)	77
Abbildung 6.3: Komponenten des Laboraufbaus	78
Abbildung 6.4: Blick in den Laboraufbau für zwei unterschiedliche Blendwellenlängen λ_B	78
Abbildung 6.5: Detektionswahrscheinlichkeiten eines Probanden für unterschiedliche Wellenlängen	79
Abbildung 6.6: Spektrale Blendempfindlichkeit der einzelnen Probanden	81
Abbildung 6.7: Spektrale Empfindlichkeit der physiologischen Blendung (PHB)	82
Abbildung 6.8: Lampenspektren mit gleicher photometrischer Leistung	83
Abbildung 6.9: Relative physiologische Blendung PHB_{rel} und Farbtemperatur CCT	84
Abbildung 6.10: Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den Ergebnissen von NIEDLING	85
Abbildung 6.11: Rezeptorverteilung nahe der Fovea nach OSTERBERG [102]	86
Abbildung 6.12: Psychologische Blendempfindlichkeit nach FEKETE [105] und BODROGI [103]	86
Abbildung 6.13: Streulicht durch Blendung und Detektion im peripheren Netzhautbereich	87

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit unterschiedlichen Technologien von Kraftfahrzeugscheinwerfern. Hierbei wird der grundlegende Kompromiss beleuchtet, den Kraftfahrzeugscheinwerfer hinsichtlich einer möglichst optimalen Sicht des Fahrers und einer möglichst geringen Blendung anderer Verkehrsteilnehmer eingehen. In diesem Kontext werden vier Fragestellungen im Themengebiet der Blendungsforschung untersucht und diskutiert.

Zunächst wird die Fragestellung erörtert, wie Blendung im Straßenverkehr wahrgenommen wird. Zur Beantwortung wurde eine Umfrage durchgeführt, die ergeben hat, dass der am häufigsten vorkommende Störfaktor bei Dunkelheitsfahrten eine Blendung durch andere Fahrzeuge ist. Zusätzlich geben 64 % aller Umfrageteilnehmer an, schon mindestens einmal durch Blendung in eine gefährliche Situation geraten zu sein. Neben dieser klaren Charakterisierung der Blendung als Störfaktor im nächtlichen Straßenverkehr zeigt die Umfrage einen deutlichen Bedarf nach besserer Sicht bei Nachtfahrten. So geben über 80 % der Umfrageteilnehmer an, sich bei Dunkelheitsfahrten eine bessere Sicht zu wünschen. Die Umfrageergebnisse unterstreichen und betonen demnach den Bedarf nach neuen Scheinwerfersystemen, die es dem Fahrer ermöglichen, signifikant besser sehen zu können, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden.

Dies führt direkt zu der zweiten Fragestellung der vorliegenden Arbeit, die sich damit beschäftigt, in wie weit ein blendfreies Fernlicht in der Lage ist, „blendfrei“ genau diesem Bedarf nach besserer Sicht gerecht zu werden. Zur Beantwortung wurde ein Feldtest unter realistischen, dynamischen Bedingungen durchgeführt, der belegt, dass ein blendfreies Fernlicht im Vergleich zu einem Xenon Abblendlicht eine signifikante Erhöhung der Detektionsdistanz um 32 m realisiert, ohne die physiologische und psychologische Blendung signifikant zu steigern. Fährt man mit 80 km/h, dann entspricht diese Vergrößerung der Detektionsdistanz einem Zeitgewinn von 1,4 Sekunden, um auf ein wahrgenommenes Objekt im Straßenverkehr reagieren zu können. Der Feldtest hat zusätzlich gezeigt, dass Xenon Abblendlicht im Vergleich zu Halogen Abblendlicht eine signifikante Erhöhung der Detektionsdistanz um 30 m realisiert. Hierbei stellt sich ebenso kein signifikanter Unterschied beider Blendungsarten ein. Werden Fahrzeuge hingegen beladen, so führt Xenon Abblendlicht ab einer Aufwärtsbewegung der Hell-Dunkel-Grenze von 1 % im Vergleich zu Halogen Abblendlicht zu einer signifikant größeren psychologischen Blendung.

Dies ist ein Ergebnis der dritten Fragestellung der vorliegenden Arbeit, die sich damit beschäftigt, in welchem Maße sich die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer durch eine Fahrzeugbeladung allgemein erhöht und von welchen Parametern diese ladungsbedingte Blendung abhängt. Zur Beantwortung wurde ein dynamischer Feldtest durchgeführt, an dem 47 Probanden über 2800 psychologische Blendungsbewertungen abgegeben haben. Die Ergebnisse des Feldtestes zeigen, dass die aktuell gültige Kopplung einer obligatorischen automatischen Leuchtweitenregelung an einen bestimmten Lampenlichtstrom oder an den Lampentyp LED nicht zielführend ist. Wird ein Fahrzeug im zulässigen Rahmen maximal beladen, so ist auf Basis der Ergebnisse des Feldtestes zu erwarten, dass es unabhängig von der Lampenart und des Lampenlichtstromes zu einer starken Blendung des Gegenverkehrs kommt.

Die vierte Fragestellung bezieht sich auf die Gültigkeit des spektralen Hellempfindlichkeitsgrades $V(\lambda)$ zur Bewertung einer spektralen Strahlungsverteilung hinsichtlich einer von ihr zu erwartenden physiologischen Blendung. Der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ spielt eine zentrale Rolle in der Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern. Diese Aussage bezieht sich sowohl auf die ECE

Regelungen für Kraftfahrzeugscheinwerfer, als auch auf die bekannten Modelle der physiologischen Blendung. Zur Klärung der Fragestellung wurde in einem Laborexperiment die spektrale physiologische Blendempfindlichkeit für ein peripher zu detektierendes Objekt bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere eine LED hoher Farbtemperatur von der $V(\lambda)$ Funktion, hinsichtlich einer von ihr ausgehenden physiologischen Blendung, unterbewertet wird. Xenon- und Halogenlampen unterscheiden sich hingegen kaum.

1 Einleitung, Motivation und Aufbau

Der Hauptteil der Informationsaufnahme beim Führen eines Kraftfahrzeuges geschieht über die Augen [1]. Bei Nachtfahrten wird die Informationsaufnahme durch die drastisch verminderte Strahlungsleistung im visuellen Spektralbereich gestört bzw. verhindert. Durch die künstliche Erzeugung visueller Strahlungsleistung durch Scheinwerfer wird der Verkehrsraum vor dem Kraftfahrzeug ausgeleuchtet und somit die Informationsaufnahme unterstützt. Objekte und Straßenführung können wahrgenommen und verarbeitet werden, und der Fahrer kann entsprechend der aufgenommenen Information reagieren. Scheinwerfer haben somit einen immensen Einfluss auf die Verkehrssicherheit bei Nachtfahrten. Die fortlaufende Optimierung von Scheinwerfern ist aus Sicht der Verkehrssicherheit eine der bedeutendsten Entwicklungen der Kraftfahrzeugtechnik.

Aus historischer Sicht wurde im Jahr 1908 die erste elektrische Lichtquelle im Automobil eingesetzt. Zuvor wurde auf Kerzen und Gaslampen zurückgegriffen. Im Jahr 1925 kam die erste Zweifadenlampe mit den Funktionen Abblend- und Fernlicht zum Einsatz. Die Integration der Scheinwerfer in die Karosserie wurde zuerst im Jahr 1945 praktiziert. Die Halogenlampe fand 1962 ihren Einzug in Scheinwerfer in Europa. Die Xenon-Gasentladungslampe folgte im Jahr 1991 [2]. Der erste Voll-LED-Scheinwerfer wurde im Jahr 2007 präsentiert [3].

Neben der stetigen Entwicklung der Lampen entwickelte sich auch die Lichtverteilung der Scheinwerfer. So wurde 1920 das symmetrische Abblendlicht zur Verminderung der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer eingeführt. Zur Erhöhung der Sichtbarkeit am rechten Straßenrand kam 1957 in Europa das asymmetrische Abblendlicht dazu (vgl. [4] und Abbildung 1.1).

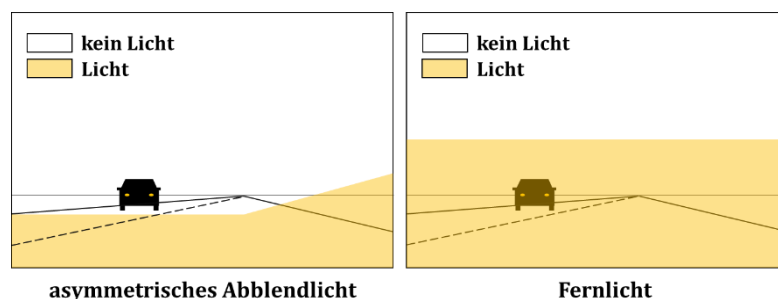


Abbildung 1.1: Asymmetrisches Abblendlicht und Fernlicht

In den folgenden Jahren entwickelte sich der Scheinwerfer hin zu einem Scheinwerfersystem. Dies bedeutet, dass der Scheinwerfer nicht nur durch das Fahrzeug mit elektrischer Leistung versorgt wird, sondern auch ein Informationsaustausch mit diesem stattfindet. Hierbei werden z.B. Informationen über den aktuellen Lenkwinkel (Kurvenlicht) oder den Zustand des Scheibenwischers (Schlechtwetterlicht) ausgetauscht. Aktuelle Scheinwerfersysteme bestehen darüber hinaus nicht mehr nur noch aus dem Scheinwerfer als Hardwarekomponente an sich, sondern verfügen über zusätzliche Sensorik wie z.B. Mono- oder Stereokameras zur Verkehrsraumerfassung. Hierbei erkennen solche Systeme z.B. andere Verkehrsteilnehmer und entblenden diese durch entsprechende Anpassung der Lichtverteilung. So wird einem Fahrer auch bei Gegenverkehr oder vorausfahrendem Verkehr eine Fahrt mit Fernlicht ermöglicht (blendfreies Fernlicht, vgl. Abbildung 1.2).

Bei der Anwesenheit von potentiell mit Blendung belastbaren Verkehrsteilnehmern müssen Scheinwerfersysteme immer einen Kompromiss eingehen zwischen der Optimierung der Sicht des Fahrers

und der möglichst geringen Blendung anderer Verkehrsteilnehmer. Um diesen Kompromiss so weit wie möglich auszureizen, wurden im Laufe der Zeit zwei Lösungsansätze entwickelt. Zum einen, das schon zuvor angesprochene blendfreie Fernlicht und zum anderen das sogenannte Markierungslicht. Bei blendfreiem Fernlicht werden durch gezielte Verwendung vertikaler Hell-Dunkel-Grenzen (Abk.: HDG) andere Verkehrsteilnehmer entblendet. Eine Hell-Dunkel-Grenze ist der Übergang zwischen einem beleuchteten Bereich (Licht) zu einem unbeleuchteten Bereich (kein Licht) (vgl. Abbildung 1.2). Einfach gesagt verfolgt ein blendfreies Fernlicht das Ziel, das Licht für den Fahrer zu maximieren. Markierungslicht hingegen geht den Weg, nur Objekte zu beleuchten, die für den Fahrer relevant sein könnten.

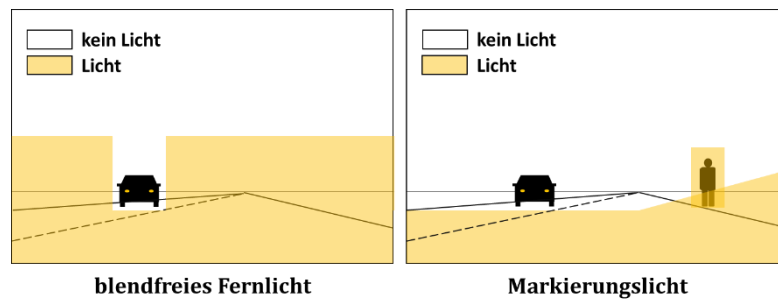


Abbildung 1.2: Blendfreies Fernlicht und Markierungslicht

Neben der Entwicklung des Scheinwerfers hin zum Scheinwerfersystem hat der Scheinwerfer auch eine immer größere Bedeutung als Designmerkmal einer Automarke. So werden Scheinwerfersysteme nicht wie z.B. Bremssysteme nur über ihren reinen Sicherheitsgewinn vermarktet und beworben, sondern auch über ihr Äußeres. Diese unvermeidbare Vermischung von Ästhetik und Funktion erhöht die Komplexität der funktionellen Entwicklung [5] [6] [7].

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich grundlegend mit dem Thema Blendung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfersystemen. Die Arbeit besteht aus den Ergebnissen einer Umfrage, zweier Feldtests und einer Laboruntersuchung. Die Motivation und der Aufbau dieser vier Hauptteile der vorliegenden Arbeit werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben. In Kapitel 2 werden die Grundlagen hinsichtlich Blendung und Scheinwerfertechnologien erläutert.

1.1 Wahrnehmung der Blendung im Straßenverkehr

Der erste Teil der vorliegenden Arbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung, in wie weit Blendung ein wahrgenommenes Problem in der Bevölkerung darstellt. Aus wissenschaftlicher Sicht gibt es viele Modelle und Untersuchungen die Blendung beschreiben [8], aber es bleibt immer die Frage offen, wie Blendung im alltäglichen Verkehrsgeschehen subjektiv wahrgenommen wird. Aus diesem Grund wurde ein Fragebogen entwickelt und mittels einer Onlineumfrage veröffentlicht. Der Aufbau des Fragebogens sowie die Ergebnisse sind in Kapitel 3 zu finden.

1.2 Dynamische Feldtests hinsichtlich Blendung und Detektionsdistanz

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden umfassende dynamische Feldtests durchgeführt. Hierbei handelt es sich zum einen um Feldtests zur Charakterisierung von blendfreiem Fernlicht hinsichtlich Blendung und Detektionsdistanz. Zum anderen wurden Feldtests durchgeführt zur Bestimmung des Einflusses der Beladung auf die Blendung von anderen Verkehrsteilnehmern. Bei den Feldtests wurde ein

besonderes Augenmerk auf die im Straßenverkehr herrschenden dynamischen Bedingungen gelegt, denen die bekannten statischen Blendungsmodelle nur schwer gerecht werden können [12] [13].

1.2.1 Charakterisierung von blendfreiem Fernlicht

Blendfreies Fernlicht ist heute schon in Fahrzeugen der Kompaktklasse erhältlich. Eingeführt wurde das blendfreie Fernlicht erstmals im Volkswagen Touareg im Jahr 2010. Im Gegensatz zu Markierungslicht ist blendfreies Fernlicht im Fahrzeugmarkt deutlich verbreiteter. Seine vielversprechende Funktionalität, die es dem Fahrer ermöglichen soll, annähernd dauerhaft mit Fernlicht fahren zu können war die Hauptmotivation, ein solches System hinsichtlich Blendung und Detektionsdistanz zu untersuchen. Hierbei hat die Motivation zwei Seiten. Zum einen ist die Frage, in wie weit ein solches System wirklich eine Fernlicht-Detektionsdistanz erreicht. Zum anderen steht die Frage im Raum, ob und in wie weit hierbei eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer in Kauf genommen wird. Zu klären ist demnach, ob ein solches System den Namen blendfreies Fernlicht zurecht tragen darf. Der Aufbau und die Ergebnisse des Feldtests sind in Kapitel 4 zu finden.

1.2.2 Einfluss der Beladung auf die Blendung

Wird ein Fahrzeug beladen, so kann dies dazu führen, dass es zu einer Rotation um die Querachse der Karosserie kommt. Diese Rotation hat zur Folge, dass die Hell-Dunkel-Grenze sich aufwärts bewegt und es so zu einer erhöhten Blendung von anderen Verkehrsteilnehmern kommen kann. Um diese ladungsbedingte Neigung des Fahrzeuges auszugleichen, lassen sich Scheinwerfer in ihrer Leuchtweite einstellen. Hierbei wird der Scheinwerfer mit einem Stellmotor justiert. Diese Leuchtweitenregelung (Abk.: LWR) ist für Fahrzeuge mit Scheinwerfern, die ihr Abblendlicht aus LED-Modulen generieren verpflichtend automatisch zu gestalten. Dies gilt ebenso, wenn die für das Abblendlicht verantwortliche Lichtquelle, unabhängig von der Art der Lichtquelle, einen Lampenlichtstrom von mehr als 2000 lm generiert [9]. Mit diesen Bedingungen versucht die Wirtschaftskommission für Europa (Abk.: ECE, engl. „Economic Commission for Europe“) die Leuchtweitenregelung potentiell stark blendender Scheinwerfer nicht dem Fahrer zu überlassen.

JEBAS et. al. haben eine Umfrage durchgeführt hinsichtlich der Einstellung der Leuchtweitenregelung. Hierbei gab fast die Hälfte der 429 Teilnehmer an, die Einstellung der Leuchtweitenregelung, unabhängig von der Beladung, auf die mittlere Leuchtweite einzustellen. Zusätzlich gaben viele Umfrageteilnehmer an, die Einstellung der Leuchtweite so gut wie nie zu verändern (vgl. [10]). Das Potential der manuellen Leuchtweitenregelung und demnach auch das Potential des Scheinwerfers an sich werden demnach kaum ausgenutzt. Dies hat zur Folge, dass es entweder zu einer geringeren Sichtweite kommt oder es entsteht bei Beladung eine Erhöhung der Blendung von anderen Verkehrsteilnehmern. Die zuvor beschriebenen Bedingungen für eine verpflichtende automatische Leuchtweitenregelung und die aktuelle Diskussion in der Groupe de Travail de Bruxelles (Abk.: GTB) hinsichtlich einer ausnahmslosen und somit obligatorischen automatischen Leuchtweitenregelung scheinen demnach berechtigt [11] [12]. Die GTB ist eine internationale Expertengruppe im Bereich der Automobil-Lichttechnik.

Die Fragestellungen dieses Teils der vorliegenden Arbeit sind: Ist es möglich, Ausnahmen von einer obligatorischen automatischen Leuchtweitenregelung zu gestalten und an welche Parameter sollten diese Ausnahmen geknüpft sein? Zur Beantwortung wurde in Kooperation mit der GTB ein Feldtest durchgeführt. Das Ziel hierbei war, die Einflussfaktoren einer durch Beladung verursachten Blendung zu identifizieren und im Anschluss potentielle Möglichkeiten aufzuzeigen, um die gesetzliche Regulierung der automatischen Leuchtweitenregelung zu verbessern. Der Aufbau und die Ergebnisse des Feldtests sind in Kapitel 5 zu finden.

1.3 Spektrale Empfindlichkeit von physiologischer Blendung

Der vierte Teil dieser Arbeit beschreibt eine Laboruntersuchung zur Feststellung der spektralen physiologischen Blendung unter mesopischen Nachtfahrbedingungen. Bekannte Modelle zur physiologischen Blendungsbewertung basieren auf photometrischen Größen. Demnach werden radiometrische Größen zur Beurteilung ihrer Blendung zunächst mit dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad für das Tagessehen $V(\lambda)$ gewichtet. Die Laboruntersuchung wurde durchgeführt, da mit der LED, als neue Lichtquelle in Scheinwerfern, eine gänzlich neue spektrale Strahlungszusammensetzung im Straßenverkehr Verwendung findet. Nachteilig ist hierbei der relativ große Blauanteil der LED. Der Vorteil der LED hingegen ist, dass die spektrale Zusammensetzung ihrer Strahlung durch den verwendeten Leuchtstoff relativ einfach veränderbar bzw. einstellbar ist [13]. Die Laboruntersuchung hatte das Ziel, einen eventuellen Unterschied zur aktuell verwendeten $V(\lambda)$ Funktion festzustellen und diesen Unterschied hinsichtlich verschiedener Lampenarten zu beurteilen. Der Aufbau und die Ergebnisse der Laboruntersuchung sind in Kapitel 6 zu finden.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für das Verständnis dieser Arbeit nötigen Grundlagen erörtert. Hierzu werden zunächst verschiedene Formen von Blendung definiert und erläutert. Im Weiteren wird auf unterschiedliche Lampenarten und Scheinwerfertechnologien eingegangen.

2.1 Blendung

2.1.1 Arten von Blendung

VOS beschreibt [14], dass das Wort Blendung in der wissenschaftlichen Literatur im Jahr 1910 durch einen Beitrag von PARSONS [15] seine erste Verwendung fand. PARSONS beschreibt hierbei schon vor über 100 Jahren, dass Blendung sowohl eine psychologische als auch physiologische Wirkung hat. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Formen von Blendung erläutert und definiert.

Die Commission Internationale de l'Éclairage (Abk.: CIE) definiert in ihrem International Lighting Vocabulary (Abk.: ILV) [16] Blendung folgendermaßen:

„condition of vision in which there is discomfort or a reduction in the ability to see details or objects, caused by an unsuitable distribution or range of luminance, or by extreme contrasts“

In dieser Definition wird Blendung demnach generell als Sehzustand beschrieben. Als Ursachen werden extreme Kontrastverhältnisse, ungeeignete Leuchtdichteverteilungen oder ungeeignete Leuchtdichteumfänge aufgeführt. Als Wirkung wird unterschieden zwischen einem Sehzustand, in dem man sich unwohl fühlt und einem Sehzustand, in dem eine reduzierte Fähigkeit Details oder Objekte zu erkennen vorliegt. Demnach unterteilt die CIE die Wirkung von Blendung in eine psychologische und eine physiologische Wirkung und definiert analog dazu in ihrem ILV [16] folgendermaßen zwei unterschiedliche Arten von Blendung:

1. Physiologische Blendung (engl. „disability glare“):
„glare that impairs the vision of objects without necessarily causing discomfort“
2. Psychologische Blendung (engl. „discomfort glare“):
„glare that causes discomfort without necessarily impairing the vision of objects“

VOS beschreibt in einer Arbeit von 1999 [17] insgesamt acht Arten von Blendung: „Blitzverblindung (ein vorübergehender Zustand kompletter Ausbleichung retinaler Photopigmente durch Exposition gegenüber einer extrem hellen Lichtquelle, z.B. einer nuklearen Explosion), paralysierende Blendung (ein Zustand des Einfrierens in der Bewegung durch plötzliche Exposition gegenüber einer hellen Lichtquelle), Blendung mit retinaler Schädigung (Exposition gegenüber Licht, das geeignet ist, die Netzhaut zu schädigen), Ablenkungsblendung (verursacht durch raschen Wechsel zwischen hellen und dunklen Phasen), Sättigungsblendung (tritt auf, wenn ein großer Teil des Gesichtsfelds eine hohe Leuchtdichte aufweist), Adaptationsblendung (tritt auf, wenn die Umgebungsleuchtdichte hoch im Verhältnis zum Adaptationszustand des Auges ist), Streulichtblendung (tritt ein, wenn durch Streulicht die optischen Medien aufgehellt werden, sodass die Diskriminationsleistung abnimmt) und Unbehaglichkeitsblendung (tritt ein durch – gegenüber der Sehaufgabe – zu große Leuchtdichteunterschiede im Gesichtsfeld).“ [18]

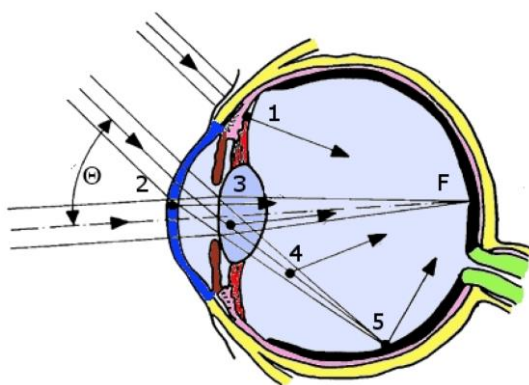
In einem Beitrag von 2003 [14] schlägt VOS eine simplifizierte Definition von Blendungsarten auf Basis einer erweiterten CIE Definition vor. Hierbei beschreibt VOS, bezugnehmend zu der Definition der CIE, dass die psychologische Blendung durch periphere Blendquellen (z.B. Straßenbeleuchtung) und die psychologische Blendung durch großflächige helle Felder (z.B. sonnenbeleuchtete Schneedecke) nicht von einer Blendungsart abgedeckt werden kann. VOS unterteilt demnach Blendung in drei Arten:

1. Physiologische Blendung (engl. „disability glare“):
Blendung verursacht durch periphere Lichtquellen, die Streulicht in den Augenmedien erzeugen, welches sich über die Netzhaut bzw. das Gesichtsfeld legt und so den Kontrast der Szenerie reduziert.
2. Psychologische Blendung (engl. „discomfort glare“):
Aufkommendes Unwohlsein, verursacht durch Lichtquellen im peripheren Gesichtsfeld.
3. Sättigungsblendung (engl. „dazzling glare“):
Blendung durch großflächige helle Flächen. Die Ursache der Wirkung einer solchen Überbelichtung liegt vermutlich nicht an der Retina, sondern daran, dass sich die Pupille übermäßig verengt und verkrampft.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Begriffe psychologische und physiologische Blendung nach der zuletzt aufgeführten Definition von VOS verwendet. In den folgenden beiden Unterkapiteln werden diese beiden Blendungsarten genauer erläutert.

2.1.2 Physiologische Blendung

Wie schon zuvor angesprochen, ist die physiologische Blendung ein Sehzustand, in dem eine oder mehrere periphere Lichtquellen zu einer messbaren Reduzierung der Sehleistung führen. Die reduzierte Sehleistung lässt sich dadurch erklären, dass es durch die peripheren Lichtquellen zu sichtbarem Streulicht kommt, welches sich als Schleier über die Netzhaut bzw. das Gesichtsfeld legt und somit den Kontrast der Szenerie reduziert [19] [14]. Das Streulicht entsteht hierbei in den Augenmedien. Die folgende Abbildung 2.1 zeigt die möglichen Entstehungsbereiche von Streulicht im Auge. Zusätzlich wird in Abbildung 2.1 der Blendwinkel θ definiert.



Entstehungsbereiche von Streulicht im Auge:

1. Streulicht, das nicht durch die Iris eintritt
2. Streuung in der Hornhaut
3. Streuung in der Linse
4. Streuung im Glaskörper
5. Diffuse Reflexion an der Netzhaut

F Abbildungsort eines fixierten Objektes auf der Fovea centralis

θ Blendwinkel: Winkel zwischen Fixationslinie und Blendquelle

Abbildung 2.1: Entstehungsbereiche von Streulicht im Auge nach SCHMIDT-CLAUSEN [20]

Die ersten Ergebnisse aus Laboruntersuchungen, die sich mit dem Thema Blendung und einer damit einhergehenden physiologischen Sehleistungsreduzierung befassen, wurden von HOLLADAY im Jahr 1926 [19] veröffentlicht. HOLLADAY führte hierbei zwei blendungsbeschreibende Parameter ein:

- Schwellenleuchtdichtedifferenz $\Delta L_{v,S}$:
Minimale Leuchtdichtedifferenz, die nötig ist, um ein Objekt von seiner Umgebung unterscheiden zu können: $\Delta L_{v,S} = L_{v,O} - L_{v,U}$
- Äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{v,eq}$:
Approximierung des Streulichtes im Auge über eine äquivalente Leuchtdichte. Zur Bestimmung der äquivalenten Schleierleuchtdichte ersetzte HOLLADAY die Blendquelle durch eine Scheibe mit veränderbarer Leuchtdichte. Durch diese Scheibe mussten die Probanden hindurchschauen und Schwellenexperimente durchführen.

Wie schon zuvor besprochen legt sich das entstehende Streulicht über die Abbildung auf der Netzhaut und reduziert so den Kontrast. Dieser Zusammenhang lässt sich anschaulich anhand dem Weberkontrast K_W erläutern. Der Weberkontrast ist definiert als die Leuchtdichtedifferenz ΔL_v zwischen einem Objekt $L_{v,O}$ und seiner Umgebung $L_{v,U}$, geteilt durch die Leuchtdichte der Umgebung $L_{v,U}$. Kommt es zu Streulicht im Auge, so legt sich die Schleierleuchtdichte $L_{v,eq}$ über die Abbildung des Objektes auf der Netzhaut als auch über die Abbildung der Umgebung auf der Netzhaut. Die Schleierleuchtdichte addiert sich demnach zur Objekt- und Umgebungsleuchtdichte und reduziert so den Kontrast:

$$\text{Weberkontrast ohne Blendung} \quad K_W = \frac{L_{v,O} - L_{v,U}}{L_{v,U}} \quad (2-1)$$

$$\text{Weberkontrast mit Blendung} \quad K_{W,B} = \frac{L_{v,O} + L_{v,eq} - (L_{v,U} + L_{v,eq})}{L_{v,U} + L_{v,eq}} \quad (2-2)$$

$$\leftrightarrow K_{W,B} = \frac{L_{v,O} - L_{v,U}}{L_{v,U} + L_{v,eq}} \quad (2-3)$$

Formel (2-3) zeigt, dass sich bei Blendung der Kontrast eines Objektes zu seiner Umgebung reduziert. Demnach ist das Objekt schlechter zu erkennen. Generell wird ein Kontrast, bei dem ein Objekt gerade von seiner Umgebung unterschieden werden kann, Schwellenkontrast $K_{W,th}$ genannt. Der Schwellenkontrast ist demnach die Schwellenleuchtdichtedifferenz $\Delta L_{v,S}$ geteilt durch die Umgebungsleuchtdichte $L_{v,U}$.

$$\text{Schwellenkontrast} \quad K_{W,th} = \frac{\Delta L_{v,S}}{L_{v,U}} \quad (2-4)$$

Stellt sich eine Situation ein, bei der man gerade ein Objekt vor seiner Umgebung erkennen kann und wird dann von einer Lichtquelle geblendet, dann reduziert sich nach Formel (2-3) der Kontrast und man kann das Objekt nicht mehr von dem Hintergrund unterscheiden. Um das Objekt wieder sichtbar zu machen, muss die Leuchtdichtedifferenz von Objekt zu Hintergrund und somit der Kontrast vergrößert werden. Demnach erhöhen sich durch Blendung die Schwellenleuchtdichtedifferenz und der Schwellenkontrast, was beide Parameter zu einer Messgröße für Blendung macht. Man spricht hierbei auch von einer durch Blendung verursachten Schwellenleuchtdichteerhöhung bzw. Schwellenkontrasterhöhung (vgl. z.B. SCHMIDT-CLAUSEN [21])

Wie zuvor angesprochen führte HOLLADAY im Jahr 1926 die beiden blendungsbeschreibenden Parameter Schwellenleuchtdichtedifferenz $\Delta L_{v,S}$ und äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{v,eq}$ ein. HOLLADAY fand hierbei in seinen Untersuchungen heraus, dass beide Parameter mit dem inversen des quadratischen Blendwinkels variieren und sich proportional mit der Blendbeleuchtungsstärke $E_{v,B}$ am Auge erhöhen. Für die äquivalente Schleierleuchtdichte ergibt sich somit nach HOLLADAY der folgende Zusammenhang:

$$L_{v_{eq}} = k \cdot \frac{E_{v_B}}{\theta^n} \quad \text{mit } n = 2 \quad (2-5)$$

Der Zusammenhang wird in der Literatur, auf Grund der Beiträge von STILES [22], auch als STILES-HOLLADAY Gleichung beschrieben. In HOLLADAYs Untersuchung ergab sich der Wert für den Faktor k zu $k = 13,7$ und später zu $k = 9,2$. In der Literatur wird auch oft ein Wert von $k \approx 10$ approximiert, wobei der Faktor k relativ großen interpersonellen Streuungen unterliegt und generell mit dem Alter steigt [14]. Weitere Modelle zur Berechnung einer äquivalenten Schleierleuchtdichte wurden unter anderem von STILES, CARRARO, VOS, ADRIAN und der CIE publiziert. Hierbei unterscheiden sich die Modelle hauptsächlich in den Werten für den Faktor k und den Exponenten n sowie in den gültigen Winkelbereichen des Blendwinkels. Die vermutlich komplexeste Modellierung der Schleierleuchtdichte wurde im Jahr 1999 von VOS und VAN DEN BERG vorgeschlagen [23] und 2002 von der CIE unter der Bezeichnung „General Disability Glare Equation“ veröffentlicht [24]. Die Formel beachtet die Pigmentierung der Augen und gilt für einen Winkelbereich von $0,1^\circ < \theta < 100^\circ$.

$$L_{v_{eq}} = E_{v_B} \left[\frac{10}{\theta^3} + \left(1 + \left(\frac{A}{62,5} \right)^4 \right) \cdot \left(\frac{5}{\theta^2} + 0,1 \frac{p}{\theta} \right) + 0,025p \right] \quad (2-6)$$

Der Faktor A steht für das Alter in Jahren und der Faktor p für die Pigmentierung der Augen. Für sehr dunkle Augen gilt hierbei ein Wert von $p = 0$. Für Augen mit geringer Pigmentierung (blaue Augen) erreicht der Faktor einen Wert von $p = 1,2$.

2.1.3 Psychologische Blendung

Wie eingangs in Kapitel 2.1.1 schon beschrieben, ist die psychologische Blendung definiert als ein Sehzustand, in dem es zu einem Unbehagen bzw. Unwohlsein durch subjektiv störende Lichtquellen kommt.

In der Innenraumbeleuchtung, Straßenbeleuchtung und Sportfeldbeleuchtung gibt es verschiedenste Methoden und Modelle zur Approximierung der psychologischen Blendung, auf die hier aber nicht weiter eingegangen werden soll. In jüngeren Untersuchungen zum Thema Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugbeleuchtung wird hauptsächlich die de Boer Skala zur Beurteilung der psychologischen Blendung eingesetzt. Die de Boer Skala ist eine Skala mit neun Punkten, bei der fünf Punkte verbal beschrieben sind. Die folgende Tabelle zeigt die englische Beschreibung der de Boer Skala, wie sie 1967 von DE BOER veröffentlicht wurde [25].

Tabelle 2.1: De Boer Skala [25]

9	8	7	6	5	4	3	2	1
unnoticeable		satisfactory		just admissible		disturbing		unbearable

Die de Boer Skala beschreibt demnach mit ihrer kleinsten Zahl den intensivsten Blendeindruck und mit ihrer größten Zahl den geringsten Blendeindruck. Dieser Umstand führte dazu, dass bei einigen vorhergehenden Untersuchungen die Bedeutung der Zahlen umgedreht wurde, um den Probanden eine natürlichere Intensitätsbeschreibung einer gefühlten Blendung zu ermöglichen. Dies galt insbesondere für Untersuchungen, bei denen nur Zahlen zur Blendungsbeschreibung verwendet wurden (vgl. z.B. [20]). Speziell zu diesem Thema führten GELLATLY und WEINTRAUB eine Untersuchung durch [26], hierbei stellten sie fest, dass sich 75 % der Probanden eine mit der gefühlten Blendung ansteigende Nummerierung der Skala wünschen. In derselben Arbeit von GELLATLY und WEINTRAUB findet der geneigte Leser auch eine Übersicht über die verschiedenen Variationsformen der de Boer Skala.

SCHMIDT-CLAUSEN und BINDELS veröffentlichten im Jahr 1977 ein Modell zur Berechnung einer de Boer Bewertung W anhand des Blendwinkels θ , der Blendbeleuchtungsstärke $E_{v,B}$ und der Adaptationsleuchtdichte $L_{v,A}$.

$$W = 5 - 2 \cdot \log \frac{E_{v,B}}{0,003 \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{L_{v,A}}{0,04}}\right) \cdot \theta^{0,46}} \quad (2-7)$$

Anwendung fand dieses Modell z.B. bei der Berechnung der abstandsabhängigen photometrischen Maximalwerte für adaptives bzw. blendfreies Fernlicht in der ECE R123 (vgl. Tabelle 7 in [27]). Hierbei wurde zunächst der de Boer Wert W_{B50L} für den Blendpunkt B50L berechnet. Anschließend wurde die Formel (2-7) umgestellt nach $E_{v,B}$, um unter Beibehaltung von W_{B50L} , für verschiedene Abstände, photometrische Obergrenzen für blendfreies Fernlicht festzuschreiben.

In den Feldtests der vorliegenden Arbeit wurde die de Boer Skala verwendet, um mittels Fragebögen die psychologische Blendung von Probanden in Erfahrung zu bringen (vgl. Abbildung 2.2). Hierbei wurde die de Boer Skala in ihrer ursprünglichen Form (vgl. Tabelle 2.1) verwendet und in den eingesetzten Fragebögen mit den Zahlen und den verbalen Beschreibungen abgebildet. Es wird im Folgenden davon abgesehen, die Skala in die deutsche Sprache zu übersetzen, da es hierbei zu missverständlichen Übersetzungen kommen kann.

Discomfort Glare Rating – (Please perform rating from top to bottom)

	Unnoticeable		Satisfactory		Just Admissible		Disturbing		Unbearable	
1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
2	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
3	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
4	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	

Abbildung 2.2: Fragebogen mit de Boer Skala

2.2 Scheinwerfertechnologien

In diesem Kapitel werden Lampenarten und optische Konzepte als auch statische und adaptive Verteilungen beschrieben. Als weiterführende Lektüre wird das Buch „Automotive Lighting and Human Vision“ von WÖRDENWEBER et. al. [28] empfohlen.

2.2.1 Lampenarten und optische Konzepte

In heutigen Kraftfahrzeugscheinwerfern werden hauptsächlich drei unterschiedliche Lampenarten eingesetzt. Hierbei handelt es sich um die Xenonlampe, die Halogenlampe und die Leuchtdiode (Abk. LED). Eine weitere Technologie ist die Lasertechnologie. Hierbei werden blaue Laser verwendet, welche einen Leuchtstoff anregen, um eine breitbandige Lichtemission zu realisieren. Die Vorteile dieser Technologie sind ein kompakter Bauraum und sehr hohe Leuchtdichten, die erreicht werden können [29]. ALBOU et. al. beschreiben in einem Beitrag, dass die Höhe von Abblendlicht- und Fernlichtmodulen seit den 70er Jahren von etwa 130 mm auf bis unter 40 mm (LED-Scheinwerfer) gesunken ist und der Trend zu schmälern

Scheinwerfern noch weiter erhalten bleibt [5]. Weiter beschreiben ALBOU et. al, dass um Scheinwerferhöhen von 10 mm zu erreichen LEDs mit einer typischen Leuchtdichte von etwa 80 cd/mm^2 nicht geeignet sind und sich hierfür insbesondere laserangeregte Leuchtstoffe eignen (200 cd/mm^2). Der Automobilhersteller BMW wird voraussichtlich mit seinem Modell i8 im Herbst 2014 das erste Serienfahrzeug auf den Markt bringen, welches über einen Laser-Scheinwerfer bzw. einen Voll-LED-Scheinwerfer mit einer „Laser-Boost“ Technologie verfügt [30]. Eine weitere Technologie, die unter anderem durch ihren Einsatz in Displays von Mobiltelefonen bekannt ist, sind organische Leuchtdioden (Abk.: OLED für engl. „organic light emitting diode“). Ein Vorteil der OLED Technologie ist insbesondere, dass hiermit relativ dünne und große Flächen mit einer homogenen Leuchtdichteverteilung erzeugt werden können. Mögliche Einsatzbereiche in der Kraftfahrzeugbeleuchtung werden im Bereich der Signalleuchten, Rückleuchten und der Innenraumbeleuchtung gesehen. Ein Einsatz der Technologie in der Kraftfahrzeugbeleuchtung wird aktuell aber dadurch behindert, dass diese noch eine relativ geringe Lebenserwartung unter hohen Temperaturen und eine UV Degradation vorweist [31] [32].

Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich verschiedener Kenngrößen von Halogen- und Xenonlampen.

Tabelle 2.2: Kenngrößen von Halogen- und Xenonlampen (Quelle: Philips)

Kenngröße	Halogenlampe H7	Xenonlampe 25 W D5S	Xenonlampe 35 W D3S
el. Leistung inkl. Elektronik	55-58 W	29 W	42 W
Lichtstrom	1500 lm	2000 lm	3200 lm
Leuchtdichte	20 Mcd/m ²	60 Mcd/m ²	70 Mcd/m ²
Farbtemperatur	3200 K	4500 K	4200 K
Lebensdauer	700 h	2000 h	2000 h

Tabelle 2.2 zeigt, dass Xenonlampen deutlich mehr Lichtstrom generieren. Dies führt prinzipiell dazu, dass Xenonscheinwerfer eine breitere und tiefere Ausleuchtung des Verkehrsraums realisieren (vgl. Abbildung 2.3). Zusätzlich haben Xenonlampen eine deutlich höhere Lebenserwartung als Halogenlampen und ihr Licht ist auf Grund der höheren Farbtemperatur dem Tageslicht ähnlicher.

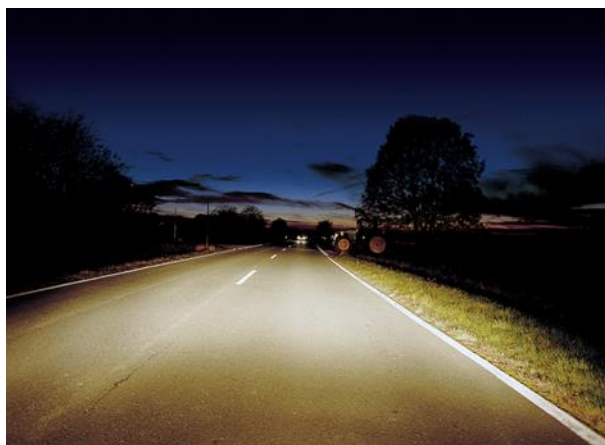


Abbildung 2.3: Lichtverteilung Halogen- (links) und Xenonscheinwerfer (rechts) (Quelle: Hella)

Der Anteil von Neuwagen mit Xenonlampen liegt bei 30 %, der von Gebrauchtwagen bei 15 % und der von Bestandsfahrzeugen bei 18 % [33]. Die Daten beziehen sich hierbei auf Deutschland und das Jahr 2012. Die 25 W Xenonlampe nimmt eine Sonderrolle ein und ist in der vorangegangenen Statistik vermutlich noch kaum vertreten. Sie wurde im Jahr 2011 zum ersten Mal in einem Serienfahrzeug eingesetzt [34]. Hauptsächlich wurde sie eingeführt, da durch die Einhaltung der 2000 lm Grenze des Lampenlichtstromes eine sonst obligatorische Scheinwerferreinigungsanlage und automatische Leuchtweitenregulierung

vermieden wird [9]. Dies macht den Einsatz der 25 W Xenonlampe deutlich günstiger als den der 35 W Xenonlampe. Zusätzlich ermöglicht die 25 W Xenonlampe ein relativ einfaches Nachrüsten eines Xenonscheinwerfers in ein Fahrzeug, welches mit einem Halogenscheinwerfer ausgestattet ist. Die 25 W Xenonlampe positioniert sich damit deutlich als Konkurrent der Halogenlampe. Arbeiten, welche die photometrische Leistung der 25 Watt Xenonlampe beurteilen, sehen diese hingegen sehr nahe an der Leistung der 35 W Xenonlampe (vgl. z.B. KIESEL [35]). Ein Vergleich der LED mit den Lampenarten Halogen und Xenon ist vergleichsweise komplexer, da die Leuchtdiode einen wesentlich breiteren Einsatzbereich ermöglicht. So werden z.B. LEDs wegen ihrer hohen Lichtausbeute in Scheinwerfern von Elektrofahrzeugen eingesetzt, um einen niedrigen Energieverbrauch zu realisieren. HAMM stellt z.B. in einem Beitrag ein LED Abblendlichtmodul mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 14 W vor [36]. Ebenso werden LEDs aber auch in hochfunktionalen Scheinwerfern wie dem Matrix Beam Scheinwerfer des Audi A8 eingesetzt [37]. Der Einsatz der LED in solch einem Scheinwerfer hat hierbei den Vorteil, dass relativ viele komplexe Lichtfunktionen auf engem Raum realisiert werden können und zusätzlich ein ansprechendes Design des Scheinwerfers ermöglicht wird. Weitere Vorteile der LED sind, dass sie eine gute Schalt- und Dimmbarkeit vorweist und dass komplexe Lichtfunktionen ohne den Einsatz von Schrittmotoren realisierbar sind [38]. Nachteilig ist, dass teilweise eine aktive Kühlung des Scheinwerfers bzw. der LEDs nötig ist. Die folgende Abbildung 2.4 zeigt den Aufbau und das Styling des Audi A8 Matrix Beam Scheinwerfers.

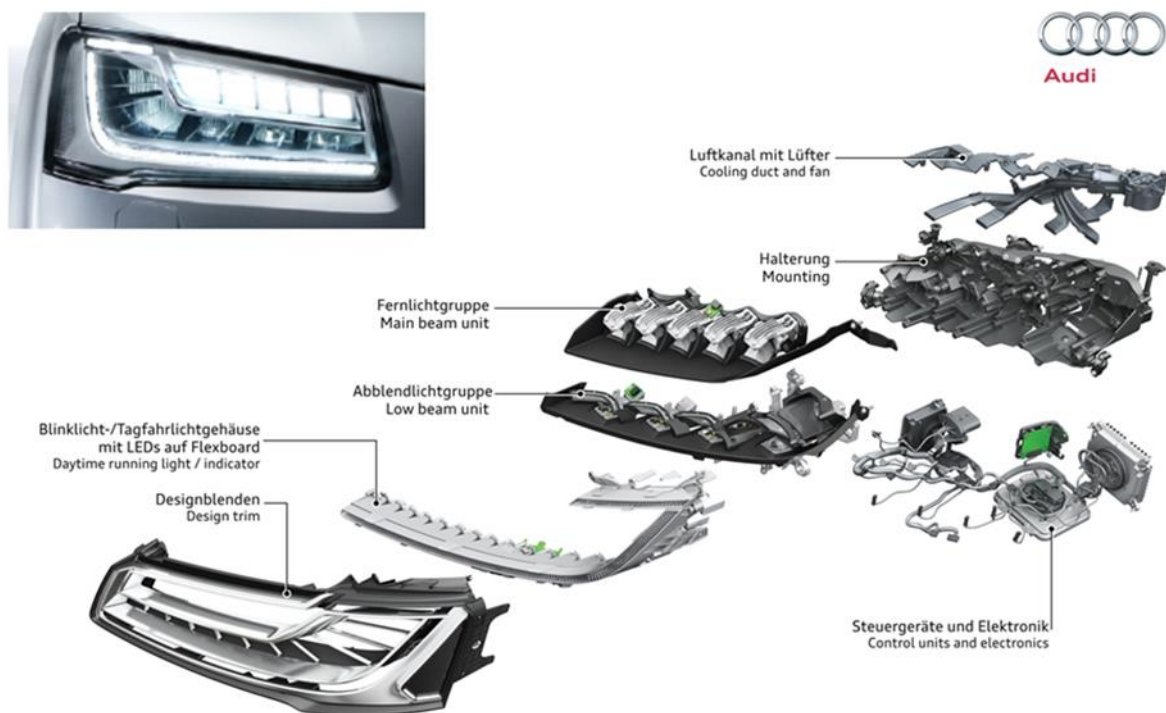


Abbildung 2.4: Audi A8 Matrix Beam Scheinwerfer (Quelle: Audi)

In heutigen Scheinwerfern kommen zwei verschiedene optische Konzepte zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um die Projektions- und Reflexionstechnologie. Generell benötigt die Projektionstechnologie eine größere Installationstiefe als die Reflexionstechnologie [28]. Im Falle der Projektionstechnologie wird das Licht einer Lampe durch einen Reflektor in die Brennebene einer plankonvexen Linse fokussiert. In der Brennebene befindet sich eine Blende, welche einen Teil des Lichtbündels abschattet und so die Form der Hell-Dunkel-Grenze bestimmt (vgl. Abbildung 2.5). Die Linse sorgt für eine unscharfe Abbildung der Blendenebene auf der Straße. Durch eine geeignete Oberflächenstrukturierung der Linse kann für gezieltes Streulicht oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze gesorgt werden, um so z.B. die Beleuchtung und die

Erkennbarkeit von Straßenschildern zu verbessern. Die Projektionstechnologie kann für Xenon- und Halogenlampen, aber auch für Leuchtdioden verwendet werden. Die folgende Abbildung 2.5 zeigt zwei Projektionsmodule, die sich durch die Art der Blende unterscheiden. Das auf der linken Seite abgebildete Projektionsmodul zeigt eine Blende, die für die Fernlichtfunktion nach unten bewegt wird, um so das Lichtbündel nicht weiter zu begrenzen. Der Zulieferermarkt bietet auch Projektionsmodule an, die mehrere Blenden mit unterschiedlichen Profilen beinhalten. So kann je nach verwendetem Profil die Lichtverteilung geändert werden [39]. Eine andere Strategie verfolgt das auf der rechten Seite abgebildete Modul. Es besitzt eine Freiformwalze mit unterschiedlichen Profilen, welche in die Walze eingeprägt sind. Durch eine Rotation der Walze kann das jeweilige Profil in den Lichtweg gebracht werden. Auf diese Weise können unterschiedliche Formen der Hell-Dunkel-Grenze und somit auch unterschiedliche Formen der Lichtverteilung auf die Straße projiziert werden [40].

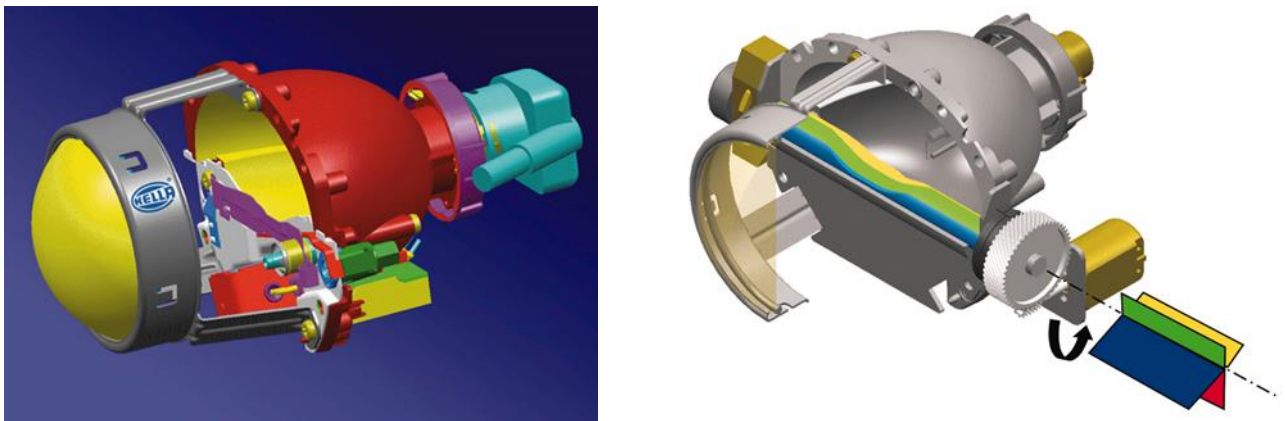


Abbildung 2.5: Projektionsmodul mit Blende (links) und Freiformwalze (rechts) (Quelle: Hella)

Die Reflexionstechnologie wird zumeist für Halogenlampen verwendet. In aktuellen Reflexionsscheinwerfern werden computerberechnete Freiformreflektoren und klare Abschlusscheiben eingesetzt. Die Freiformreflektoren reflektieren hierbei gezielt die Wendelbilder in den Verkehrsraum und erzeugen somit eine zuvor berechnete Lichtverteilung. In älteren Systemen wurden Parabolreflektoren und lichtlenkende Abschlusscheiben eingesetzt. Die folgende Abbildung 2.6 zeigt einen Halogen-Reflexionsscheinwerfer mit Freiformreflektoren.



Abbildung 2.6: Halogen Reflexionsscheinwerfer mit Freiformreflektoren (Quelle: Hella)

Im Falle von LED-Scheinwerfern wird sowohl auf die Projektions- als auch auf die Reflexionstechnologie zurückgegriffen, wobei der Einsatz der Reflexionstechnologie kostengünstiger ist [7].

2.2.2 Adaptive Frontbeleuchtungssysteme

Die grundlegende Idee von Kraftfahrzeugscheinwerfern ist, für den Fahrer eine maximale visuelle Informationsaufnahme zu realisieren, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Um diesen Kompromiss weiter zu optimieren, wurden und werden adaptive Frontbeleuchtungssysteme (Abk.: AFS)

entwickelt. Diese erfassen mittels Sensorik den Verkehrsraum, um diesen möglichst optimal und blendfrei auszuleuchten. Generell wird im Folgenden zwischen adaptivem Abblendlicht und adaptivem Fernlicht bzw. blendfreiem Fernlicht unterschieden. Grundlegend werden die photometrischen Anforderungen von adaptiven Frontbeleuchtungssystemen in der Regelung ECE R123 [27] definiert. Die Schaltbedingungen und die Anforderung an die Sensorik zur Verkehrsraumerfassung werden in der Regelung ECE R48 [9] beschrieben.

2.2.2.1 *Adaptives Abblendlicht*

Die Regelung ECE R123 beschreibt insgesamt vier unterschiedliche Abblendlichtverteilungen, die unter den Bedingungen der ECE R48 verwendet werden dürfen.

- Klasse C: „Normales Abblendlicht“ [27]
- Klasse V: „Verwendung in beleuchteten Gebieten wie z.B. in Städten“ [27]
- Klasse W: „Verwendung unter ungünstigen Bedingungen wie z.B. bei nassen Straßen“ [27]
- Klasse E: „Verwendung auf Straßen wie z.B. Autobahnen“ [27]

Das Abblendlicht der Klasse V zeichnet sich dadurch aus, dass es eine horizontal verbreiterte Lichtverteilung aufweist und die Lichtverteilung zur besseren Vorfeldausleuchtung im Gegensatz zu Klasse C gesenkt wird. Dies ermöglicht in Städten und Ortschaften eine bessere Erkennbarkeit von Fußgängern, Verkehrsschildern und Kreuzungen. Im Falle des Abblendlichtes der Klasse W wird die Lichtstärke vor dem Fahrzeug zur Blendungsvermeidung reduziert. Hierfür wird der linke Scheinwerfer nach unten und nach außen geneigt. Dies führt zusätzlich zu einer besseren Ausleuchtung des Fahrbahnrandes, was wiederum die Orientierung bei Schlechtwetterfahrten unterstützt. Abblendlicht der Klasse E ist optimiert für höhere Geschwindigkeiten. Aus diesem Grund wird die Hell-Dunkel-Grenze angehoben, um die Detektionsdistanz zu vergrößern. Die mögliche Anhebung hängt hierbei von der gefahrenen Geschwindigkeit ab und wird in der Regulierung ECE R48 in vier Stufen beschrieben: E3 (Min.) → E2 → E1 → E. Maximal kann die Hell-Dunkel-Grenze ab einer Geschwindigkeit von 110 km/h in der Stufe E auf einen Winkel von $0,23^\circ$ unter der Horizontalebene (H-H) angehoben werden.

Verfügt das Fahrzeug über ein Kamerasystem zur Erkennung von anderen Fahrzeugen, so können die unterschiedlichen Abblendlichtklassen, inkl. der Stufen der Klasse E, sukzessiv durchlaufen werden, um so die Hell-Dunkel-Grenze dem vorausfahrenden und entgegenkommenden Verkehr anzupassen und die Detektionsdistanz des Fahrers zu optimieren. Ein solches System wird adaptive Hell-Dunkel-Grenze (Abk.: aHDG) oder gleitende Leuchtweite (Abk.: GLW) genannt. Die folgende Abbildung 2.7 zeigt die Funktionsweise der gleitenden Leuchtweite.



Abbildung 2.7: Gleitende Leuchtweite (Quelle: Hella)

Eine gleitende Leuchtweite wird technisch z.B. realisiert durch ein Projektionsmodul mit einer angepassten Freiformwalze, welche zur Veränderung der Lage und Form der Hell-Dunkel-Grenze ihre Rotationslage ändert [39].

Die Regelung ECE R123 bietet mit dem „Kurvenlichtmodus“ noch eine weitere Möglichkeit, das Abblendlicht an den Verkehrsraum anzupassen. Hierbei wird grundlegend zwischen dynamischen und statischen Kurvenlicht unterschieden. Im Falle des dynamischen Kurvenlichtes wird der Knick der Hell-Dunkel-Grenze adaptiv in den Kurvenverlauf geschwenkt, um so die Ausleuchtung des Straßenverlaufes zu verbessern. Dynamisches Kurvenlicht ist auch für Fernlicht einsetzbar. Technisch wird dynamisches Kurvenlicht realisiert, indem z.B. ein Projektionsmodul mit einem Aktuator um seine Hochachse gedreht wird. Im Falle des statischen Kurvenlichtes wird ein Zusatzscheinwerfer hinzugeschaltet, um so z.B. bei einem Abbiegevorgang besser in die Straße, in die abgebogen wird, blicken zu können. Statisches Kurvenlicht wird auch Abbiegelicht genannt. Die folgende Abbildung 2.8 zeigt dynamisches und statisches Kurvenlicht.

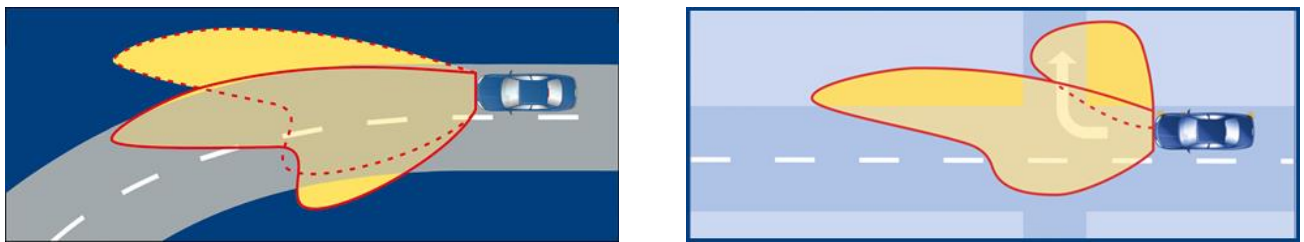


Abbildung 2.8: Dynamisches (links) und statisches Kurvenlicht (rechts) (Quelle: Hella)

Abschließend sei in diesem Kapitel noch der Fernlichtassistent genannt. Der Fernlichtassistent automatisiert das Schalten zwischen Abblend- und Fernlicht. SPRUTE zeigte in seiner Arbeit, dass die Fernlichtfunktion deutlich zu selten genutzt wird [41] [20]. Ein Fernlichtassistent maximiert die Zeit, mit der in Fernlicht gefahren wird, und sorgt demnach dafür, dass der Verkehrsraum mit dem vollen Potential des Lichtsystems ausgeleuchtet wird. Hierfür wird ein Kamerasystem benötigt, welches entgegenkommenden oder vorausfahrenden Verkehr erkennt, um rechtzeitig abzublenden. Die Regelung ECE R48 beschreibt hierbei, dass das Fernlicht nur automatisch aktiviert werden darf, wenn sich kein vorausfahrendes Fahrzeug in einem Abstand von bis zu 100 m und kein entgegenkommendes Fahrzeug in einem Abstand von bis zu 400 m befindet. Zusätzlich darf nicht aufgeblendet werden, wenn sich ein entgegenkommendes, beleuchtetes Fahrrad in einem Abstand von bis zu 75 m befindet.

2.2.2.2 Blendfreies Fernlicht

Die neueste Entwicklung im Bereich adaptiver Scheinwerfersysteme ist, neben dem eingangs erwähnten Markierungslicht (vgl. Abbildung 1.2), das blendfreie Fernlicht. Das grundlegende Ziel von blendfreiem Fernlicht ist, dem Fahrer eine dauerhafte Fahrt mit Fernlicht zu ermöglichen, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Je nach Automobilhersteller, Zulieferer oder verwendeter Lampenart wird blendfreies Fernlicht auch adaptives Teilfernlicht, Matrix Beam oder auch Multispotsystem genannt. Entgegen der unterschiedlichen Benennung der Systeme ist die grundlegende Strategie der Lichtsysteme immer die gleiche: Es werden kameragesteuerte vertikale Hell-Dunkel-Grenzen in die Lichtverteilung integriert. Hierbei erkennt ein Kamerasystem andere Verkehrsteilnehmer und steuert die Scheinwerfer so, dass die vertikalen Hell-Dunkel-Grenzen einen blendfreien Bereich erzeugen (vgl. Abbildung 2.9). Durch den Einsatz von vertikalen Hell-Dunkel-Grenzen kann somit, trotz der Anwesenheit anderer Verkehrsteilnehmer, im Vergleich zu einer Abblendlichtverteilung deutlich mehr Licht sowohl in der Nähe als auch über der Horizontallinie (H-H) in die Lichtverteilung eingebracht werden. Dies hat zur Folge, dass die Detektionsdistanz theoretisch auf Fernlichtniveau gesteigert werden kann.

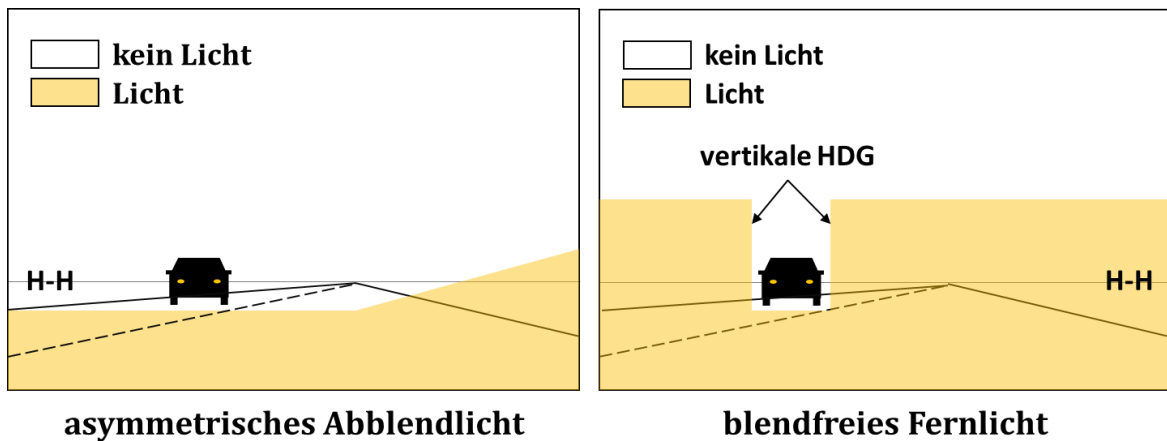


Abbildung 2.9: Asymmetrisches Abblendlicht und blendfreies Fernlicht

Zur Realisierung von blendfreiem Fernlicht werden, aus technologischer Sicht, zwei unterschiedliche Prinzipien verfolgt (vgl. Abbildung 2.10):

1. Bewegung zweier meist L-förmiger Verteilungen
2. Verteilung mit zu- und abschaltbaren Segmenten

Im Falle von Prinzip 1 wird eine oft L-förmige Verteilung in einem Modul des linken Scheinwerfers und eine gespiegelte L-förmige Verteilung in einem Modul des rechten Scheinwerfers erzeugt. Durch Drehung der Module um ihre Hochachsen werden die vertikalen Hell-Dunkel-Kanten entsprechend horizontal bewegt. Dieses Prinzip findet insbesondere Verwendung im Falle von blendfreiem Fernlicht auf Xenonbasis. Hierbei wird in den Projektionsmodulen eine vertikale Hell-Dunkel-Kante durch eine entsprechende Blenden- bzw. Walzenform realisiert [39] [40]. Zur horizontalen Bewegung der vertikalen Hell-Dunkel-Grenzen wird die Kurvenlichtaktuatorik verwendet. Das Prinzip 1 wird aber auch bei LED-Scheinwerfern eingesetzt, hierbei erzeugen spezielle bewegliche Module im linken und rechten Scheinwerfer jeweils eine entsprechende Verteilung. Prinzip 2 findet ausschließlich Verwendung in LED-Scheinwerfern. Hierbei erzeugen LEDs mittels speziell angepassten Optiken streifenförmige Segmente, die einzeln geschaltet und gedimmt werden können. Der Vorteil ist hierbei, dass keine Aktuatorik nötig ist [37]. Nachteilig können eine durch die Segmente bedingte, inhomogene Verteilung und eine begrenzte Auflösung sein.

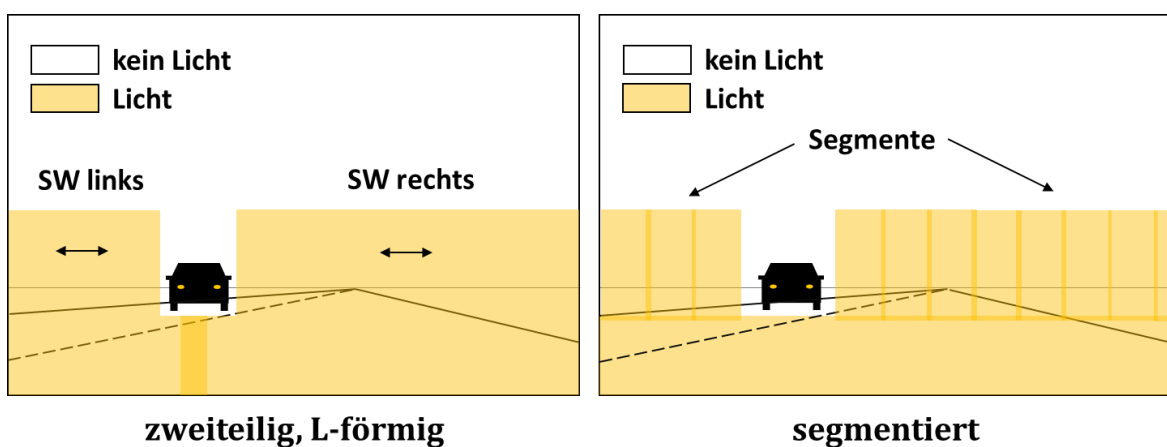


Abbildung 2.10: Arten von blendfreiem Fernlicht

Als weiterführende Literatur zu LED-Scheinwerfern nach Prinzip 2 wird die Arbeit von TOTZAUER empfohlen [42]. Hier wird unter anderem eingehend das dynamische Verhalten, die nötige Segmentaufteilung und Kalibrierung solcher Systeme diskutiert und untersucht.

3 Umfrage: Relevanz von Blendung im Straßenverkehr

3.1 Einleitung

Es ist bekannt und eingehend erforscht, dass Blendung eine physiologische als auch eine psychologische Wirkung auf den menschlichen Körper hat. Wie Blendung hingegen im alltäglichen Straßenverkehr wahrgenommen wird und welchen Stellenwert Blendung für den durchschnittlichen Fahrer hat, ist fast gänzlich unbekannt. Aus diesem Grund wurde eine Umfrage durchgeführt, welche die folgenden Themengebiete behandelt:

- Wahrnehmung von Blendung im Straßenverkehr
- Wahrnehmung von Dunkelheitsfahrten
- Wahrnehmung von unterschiedlichen Scheinwerfern

3.2 Methodik

Die Umfrage wurde vom 20.12.2013 bis 28.02.2014 durchgeführt und mittels der Onlineplattform SoSci Survey erstellt und auch über diese Plattform im Internet veröffentlicht. Verbreitet wurde die Umfrage im Kollegen- und Bekanntenkreis. Um möglichst viele Teilnehmer zu erreichen, wurde die Umfrage aber auch in Onlineportalen wie Facebook und verschiedenen Onlineforen verbreitet.

Insgesamt wurde der Fragebogen 567-mal vollständig ausgefüllt. Um die Teilnehmer auszuschließen, die den Fragebogen wissentlich falsch, z.B. ohne die Fragen zu lesen, ausgefüllt haben, wurde eine von LEINER vorgeschlagene Methodik angewendet. LEINER hat in seiner Arbeit [43] festgestellt, dass sich die Datensätze solcher Teilnehmer am ehesten über die Bearbeitungsgeschwindigkeit der einzelnen Umfrageseiten identifizieren lassen. Er schlägt hierbei vor, für jede Seite eines Teilnehmers einen Geschwindigkeitsfaktor zu berechnen. Dieser Faktor berechnet sich aus dem Median der Seitenbearbeitungszeit aller Teilnehmer, geteilt durch die Seitenbearbeitungszeit des individuellen Teilnehmers. Ein Faktor von z.B. 2 würde bedeuten, dass der betrachtete Teilnehmer die Seite doppelt so schnell bearbeitet hat wie der Median aller Teilnehmer. Im Weiteren werden die einzelnen Geschwindigkeitsfaktoren der einzelnen Seiten eines Teilnehmers gemittelt. LEINER empfiehlt einen durchschnittlichen Geschwindigkeitsfaktor von 1,6, der nicht überschritten werden sollte. Die 567 Datensätze wurden auf Basis dieser Methodik analysiert. Hierbei haben sich 509 Datensätze als valide herausgestellt. Die folgende Auswertung basiert demnach auf insgesamt 509 Datensätzen.

Der Fragebogen beinhaltet hauptsächlich drei unterschiedliche Fragetypen. Bei Typ 1 kann der Teilnehmer ein oder mehrere Kästchen anklicken, um so z.B. anzugeben, ob er eine Brille trägt oder nicht. Bei Typ 2 kann der Teilnehmer einen Schieberegler auf einer Skala mit fünf diskreten Stufen bewegen. Zwischenwerte sind demnach nicht wählbar. Bei Typ 3 muss der Teilnehmer eine Rangfolge festlegen. Zur Veranschaulichung sind alle drei Typen in der folgenden Abbildung 3.1 dargestellt.

Typ 1

Wie viele Kilometer fahren Sie ca. pro Jahr? [A101]



Typ 2

Wie oft fahren Sie in Dunkelheit? [A103]



Typ 3

Wo fahren Sie am häufigsten bei Dunkelheit? [A104]

Bitte sortieren Sie die folgenden Straßentypen absteigend. Hierfür ziehen Sie die rechteckigen Kästchen mit der Maus zu den entsprechenden Zahlenfeldern. Das Zahlenfeld 1 ist mit dem Straßentyp zu belegen, welchen Sie am häufigsten befahren.

Autobahn	Landstraße	1
		2
Stadt		3

Abbildung 3.1: Fragetypen

Der vollständige Fragebogen ist im Anhang dieser Arbeit abgedruckt, wobei hinter jeder Frage eine individuelle Markierung der Form [A123] angegeben ist. Ebenso sind die in dem folgenden Kapitel dargestellten Ergebnisse mit dieser Markierung versehen. So kann nachvollzogen werden auf welcher Frage die jeweiligen Ergebnisse basieren.

3.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Umfrage beschrieben. Die Ergebnisse sind hierbei thematisch in Unterkapitel gegliedert. Falls Fehlerbalken in Abbildung angegeben sind, so stehen diese für die einfache Standardabweichung.

3.3.1 Charakterisierung der Teilnehmer

Dieses Kapitel beschreibt unter anderem die Altersverteilung, die Geschlechteranteile und Jahresfahrleistungen der Teilnehmer.

Wie schon zuvor angesprochen wurden 509 Datensätze ausgewertet. Wenn man davon ausgeht, dass kein Teilnehmer den Fragebogen mehrfach ausgefüllt hat, dann ergibt sich eine Teilnehmerzahl von 509 Personen. Der Frauenanteil lag mit 118 Teilnehmerinnen bei relativ geringen 23 %. Mit einem Wert von 51 % trägt ca. die Hälfte aller Teilnehmer eine Sehhilfe. Die durchschnittliche Bearbeitungszeit des Fragebogens lag bei 9 Minuten und 24 Sekunden, das Durchschnittsalter der Teilnehmer bei 37,6 Jahren. Der jüngste Teilnehmer war 17 und der älteste Teilnehmer 79 Jahre alt. Mit einem Anteil von 92 % sind die meisten Teilnehmer in Deutschland geboren, und mit einem Anteil von 97 % fahren die meisten Teilnehmer in Deutschland. Im Durchschnitt haben die Teilnehmer ihren Führerschein seit 20 Jahren. Die folgende Abbildung 3.2 zeigt ein Histogramm der Altersverteilung der Teilnehmer.

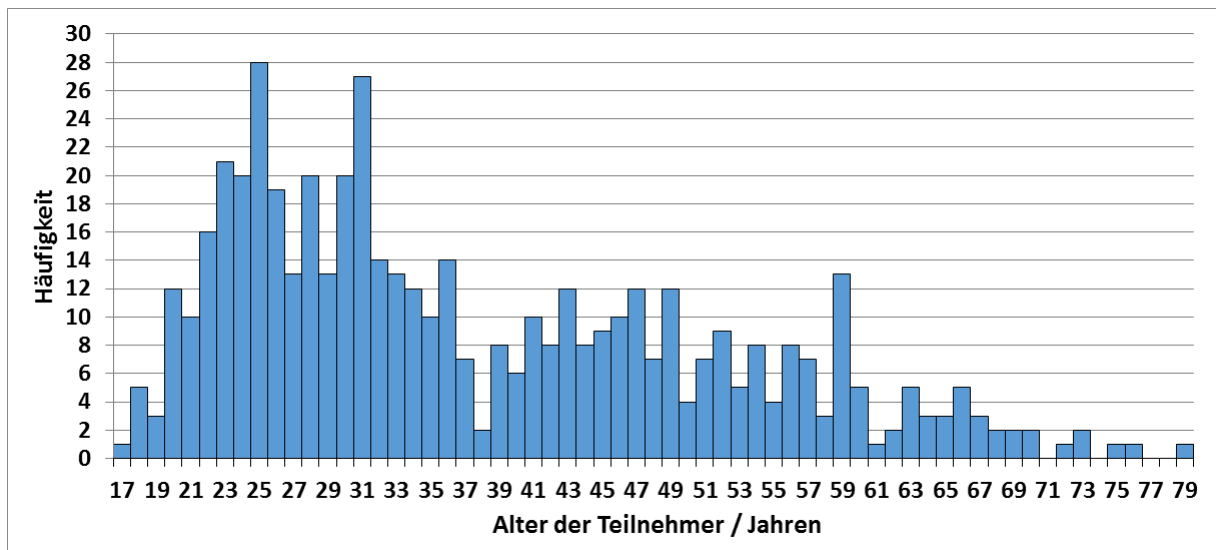


Abbildung 3.2: Histogramm der Altersverteilung der Umfrageteilnehmer [A001]

Wie in der folgenden Abbildung 3.3 ersichtlich ist, geben die meisten Teilnehmer an, im Jahr zwischen 10.001 km und 20.000 km zu fahren. In Abbildung 3.4 ist die Jahresfahrleistung gegenüber dem Teilnehmeralter aufgetragen. Hierbei repräsentiert jeder dargestellte Datenpunkt jeweils das mittlere Alter von 73 Teilnehmern (letzter Punkt 71 Teilnehmer) und die mittlere Jahresfahrleistung. Die Abbildung zeigt, dass die Jahresfahrleistung zunächst bis zu einem Alter von etwa 45 Jahren steigt und danach wieder abfällt. Dies entspricht einer Veröffentlichung des ADAC, in der beschrieben wird, dass die Altersgruppe der 35- bis unter 45-Jährigen die Altersgruppe mit dem höchsten Fahrleistungsanteil ist [44].

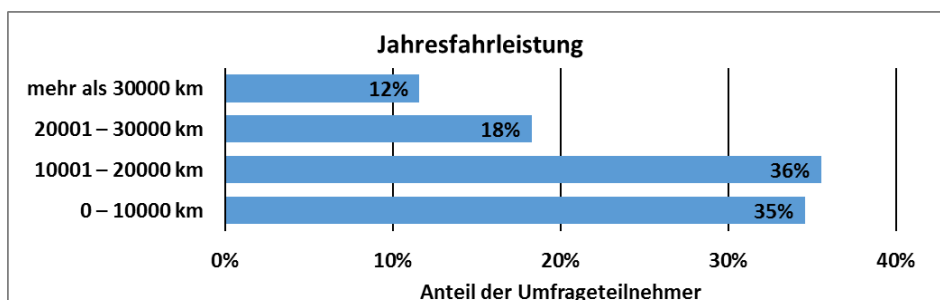


Abbildung 3.3: Jahresfahrleistung [A101]

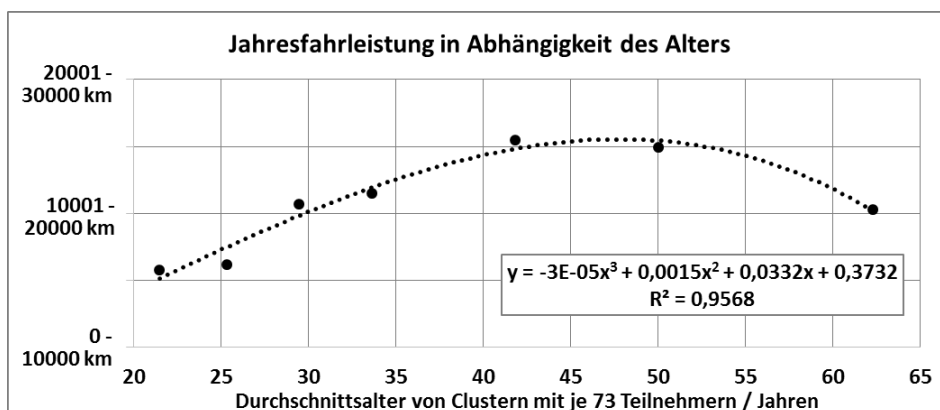


Abbildung 3.4: Jahresfahrleistung in Abhängigkeit des Alters [A101]&[A001]

3.3.2 Fahrzeuge und Scheinwerfer der Teilnehmer

Dieses Kapitel beschreibt unter anderem die Scheinwerfer, Lampen- und Fahrzeugtypen der Teilnehmer.

Abbildung 3.5 zeigt, dass 96,5 % der Teilnehmer hauptsächlich PKW fahren. Teilnehmer, die vorwiegend mit LKW oder Motorrad fahren, sind mit 1,8 % gering vertreten.

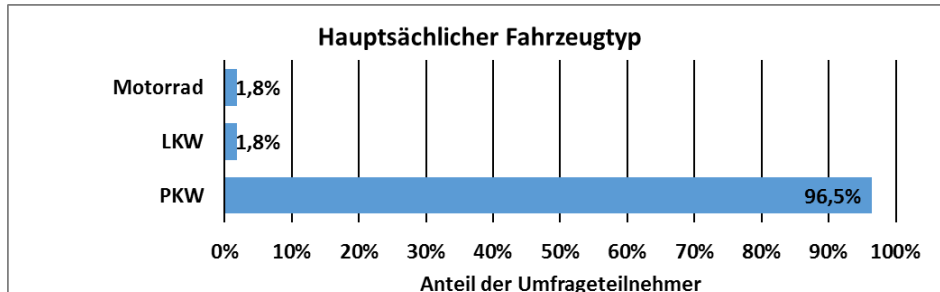


Abbildung 3.5: Hauptsächlich Fahrzeugtyp [A201]

In Abbildung 3.6 ist ersichtlich, dass die meisten Teilnehmer Fahrzeuge mit Halogenscheinwerfern fahren. Ein Anteil von 22,6 % der Teilnehmer fahren Fahrzeuge mit Xenonscheinwerfern. Dies entspricht in etwa der in Kapitel 2.2.1 aufgeführten Statistik. Diese beschreibt, dass im Jahr 2012 in Deutschland 18 % der Bestandsfahrzeuge mit Xenonscheinwerfern ausgestattet waren. LED-Scheinwerfer sind mit 1,4 % bzw. 7 Probanden vertreten. Abbildung 3.7 zeigt die Zufriedenheit der Teilnehmer hinsichtlich des Lampentyps. Es ist ersichtlich, dass Teilnehmer mit Halogenscheinwerfern zwischen mittelmäßig und überwiegend zufrieden sind. Teilnehmer mit Xenon- und LED-Scheinwerfern sind im Mittel mehr als überwiegend zufrieden mit ihrem Lampentyp.

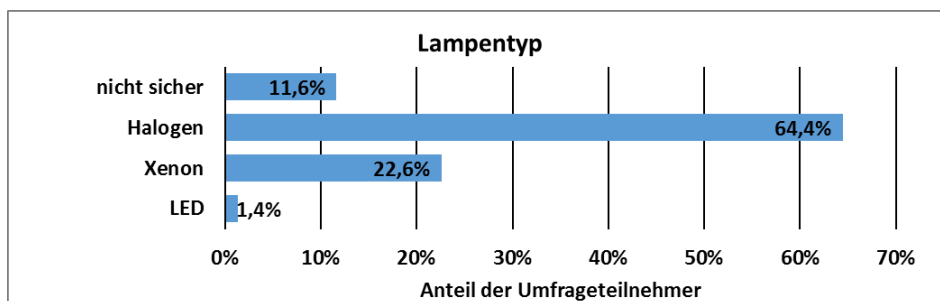


Abbildung 3.6: Lampentyp [A202]

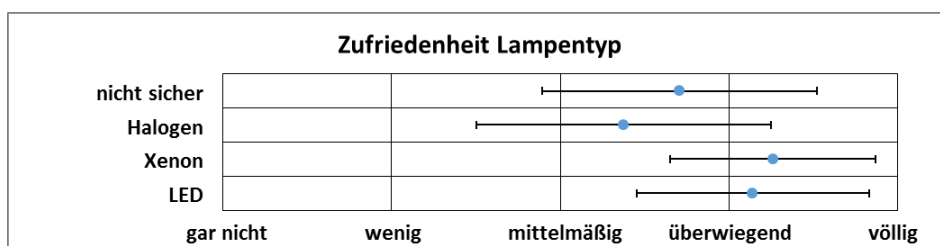


Abbildung 3.7: Zufriedenheit Lampentyp [A208]&[A202]

Abbildung 3.8 zeigt die Häufigkeit von Lichtassistenzsystemen der Teilnehmer. Hierbei geben 72,7 % der Teilnehmer an, keines der aufgeführten Systeme in ihrem Fahrzeug zu besitzen. Das am häufigsten vorkommende System ist Abbiegelicht, gefolgt von Kurvenlicht. Abbildung 3.9 zeigt die Zufriedenheit der Teilnehmer mit ihren Lichtassistenzsystemen. Hierbei zeichnet sich eine Tendenz ab, dass die Zufriedenheit mit der Komplexität bzw. dem Funktionsumfang zunimmt. Eine Ausnahme von dieser

Tendenz ist der Fernlichtassistent. Wobei auch hier die Teilnehmer noch im Mittel überwiegend zufrieden mit dem System sind.

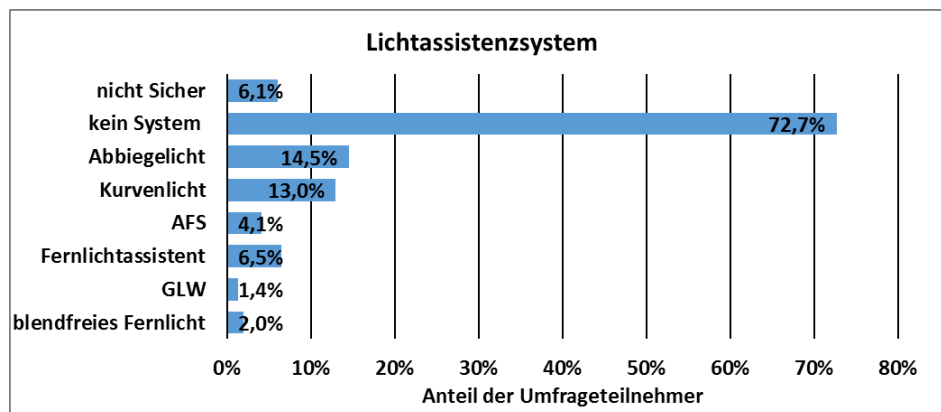


Abbildung 3.8: Lichtassistenzsysteme [A203]

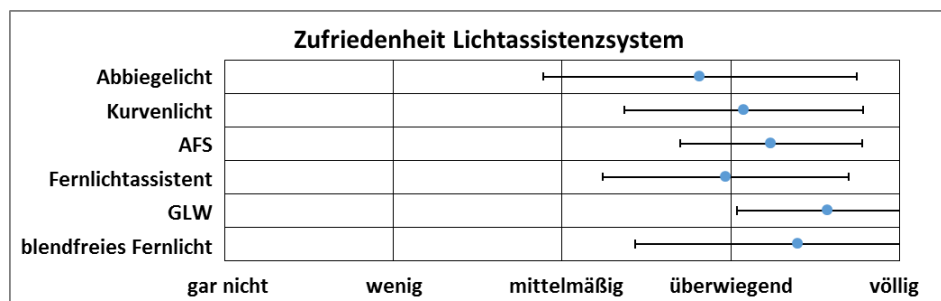


Abbildung 3.9: Zufriedenheit Lichtassistenzsysteme [A209]

In der folgenden Abbildung 3.10 ist die Zahlungsbereitschaft der Teilnehmer für eine deutlich bessere Sicht bei Nachtfahrten dargestellt. Es zeichnet sich ab, dass die meisten Teilnehmer bereit sind 500 € zu zahlen. Etwa 20 % aller Teilnehmer sind auch bereit, mehr als 500 € zahlen. Demgegenüber sind 16,3 % der Teilnehmer nicht willens, einen Aufpreis für bessere Sicht bei Nachtfahrten in Kauf zu nehmen. Diese Ergebnisse entsprechen den Ergebnissen einer vorhergehenden Umfrage von SÖLLNER et. al. [45]. Hierbei hat sich bei SÖLLNER et. al. ebenso herausgestellt, dass hinsichtlich der Zahlungsbereitschaft für eine bessere Sicht die zwei größten Gruppen sich dahingehend charakterisieren lassen, dass entweder ein Aufpreis von 500 € und mehr oder gar kein Aufpreis gezahlt werden würde.

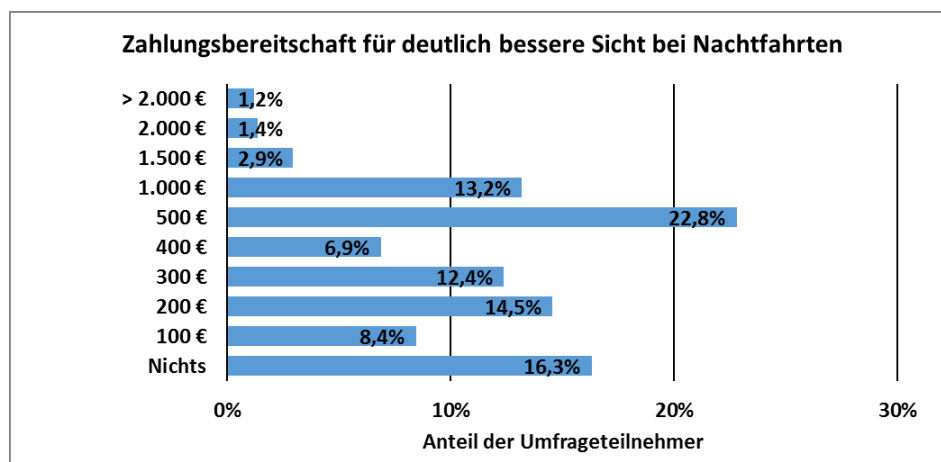


Abbildung 3.10: Aufpreis für bessere Sicht bei Nachtfahrten [A206]

In Abbildung 3.11 ist dargestellt wie häufig die Teilnehmer ihre Scheinwerfer einstellen lassen. Hierbei gibt mit 27,9 % die größte Gruppe der Teilnehmer an, ihre Scheinwerfer mindestens einmal im Jahr einstellen zu lassen. Demgegenüber stehen 21 % aller Teilnehmer, die ihre Scheinwerfer noch nie einstellen lassen.

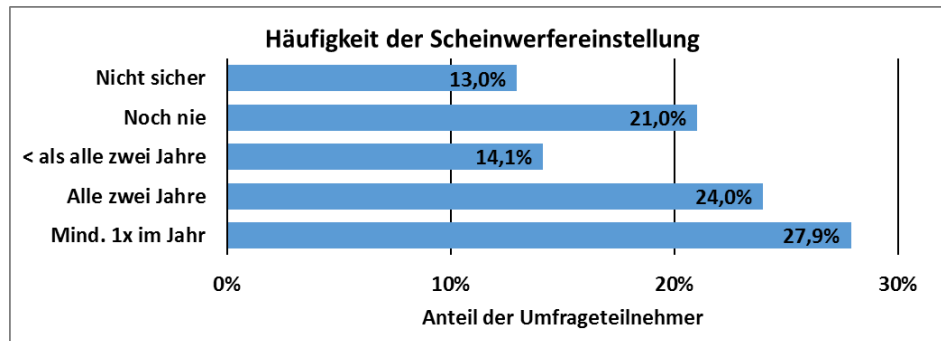


Abbildung 3.11: Häufigkeit der Scheinwerfereinstellung [A207]

3.3.3 Wahrnehmung von Dunkelheitsfahrten

Dieses Kapitel beschreibt die Wahrnehmung der Teilnehmer hinsichtlich Dunkelheitsfahrten. Dies beinhaltet unter anderem den gefühlten Stress, die befahrenen Straßentypen, auftretende Störfaktoren und generell wie gerne die Teilnehmer in Dunkelheit fahren.

Abbildung 3.12 zeigt die generelle Häufigkeit, mit der die Teilnehmer in Dunkelheit fahren. Es zeichnen sich zwei Gruppen von Teilnehmern ab. Die eine Gruppe besteht aus 50,1 % aller Teilnehmer und fährt oft in Dunkelheit. Die zweite Gruppe besteht aus 43,4 % und fährt manchmal in Dunkelheit. In Abbildung 3.12 ist die Häufigkeit von Dunkelheitsfahrten gegenüber dem Teilnehmeralter aufgetragen. Hierbei repräsentiert jeder dargestellte Datenpunkt jeweils das mittlere Alter von 73 Teilnehmern (letzter Punkt 71 Teilnehmer) und die mittlere Häufigkeit von Dunkelheitsfahrten. Die Abbildung zeigt, dass ähnlich wie bei Abbildung 3.4 die Häufigkeit der Dunkelheitsfahrten zunächst bis zu einem Alter von etwa 45 Jahren steigt und danach wieder abfällt.

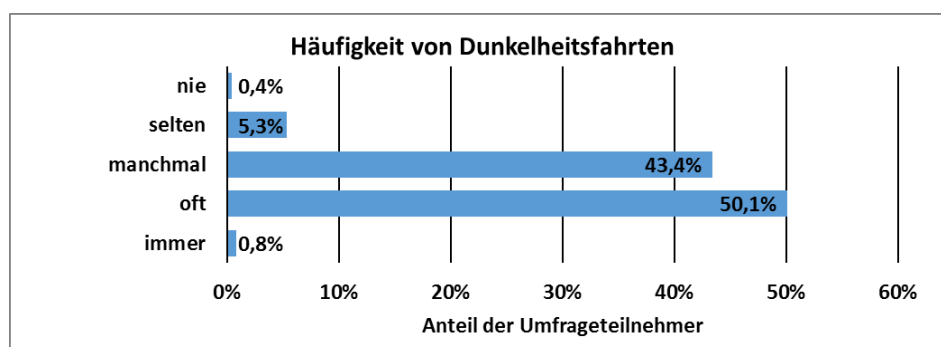


Abbildung 3.12: Häufigkeit von Dunkelheitsfahrten [A103]

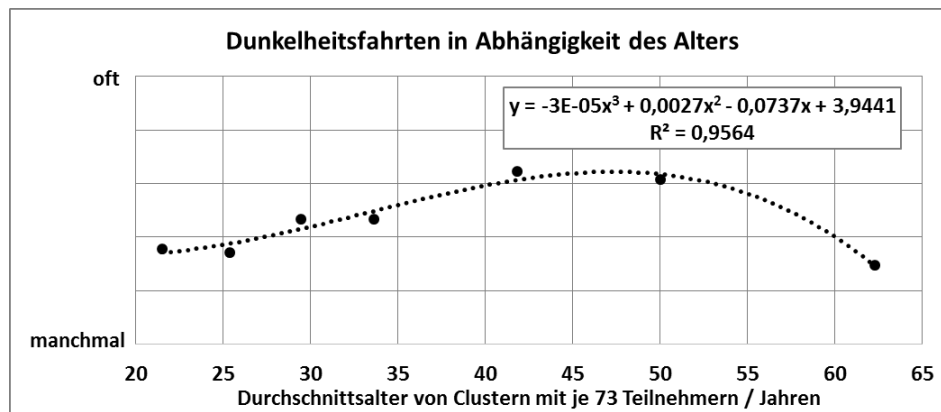


Abbildung 3.13: Dunkelheitsfahrten in Abhängigkeit des Alters [A103]&[A001]

Abbildung 3.14 zeigt die von den Teilnehmern an meisten befahrenen Straßentypen bei Dunkelheitsfahrten. Hierbei gibt mit 41,2 % die größte Gruppe der Teilnehmer an, in Dunkelheit meistens auf Landstraßen zu fahren. Die zweitgrößte Gruppe fährt in Dunkelheit meistens in der Stadt. Die drittgrößte Gruppe fährt in Dunkelheit zumeist auf Autobahnen. Hierbei ist diese Gruppe mit 27,9 % nur unwesentlich kleiner als die Gruppe, die zumeist in Städten fährt.

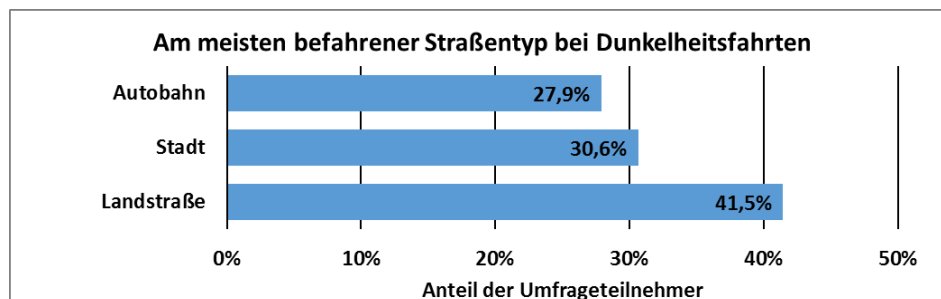


Abbildung 3.14: Am meisten befahrener Straßentyp bei Dunkelheitsfahrten [A104]

In der folgenden Abbildung 3.15 ist der Anteil der Teilnehmer dargestellt, die gerne in Dunkelheit fahren. Zusätzlich werden auch die jeweiligen Anteile der Teilnehmer mit Xenon- und Halogenscheinwerfern dargestellt. Die Abbildung zeigt hierbei, dass etwa 50 % aller Teilnehmer gerne in Dunkelheit fahren. Betrachtet man die Auswertung nach den Lampentypen, so zeigt sich, dass 48,5 % aller Teilnehmer mit Halogenscheinwerfern gerne in Dunkelheit fahren. Teilnehmer mit Xenonscheinwerfern hingegen geben mit einem Wert von 61,7 % deutlich öfter an, dass sie gerne in Dunkelheit fahren. Abbildung 3.16 zeigt den Anteil der gerne in Dunkelheit Fahrenden, aufgeteilt nach dem Geschlecht. Hierbei stellt sich heraus, dass die männlichen Teilnehmer fast doppelt so häufig angeben, gerne in Dunkelheit zu fahren.

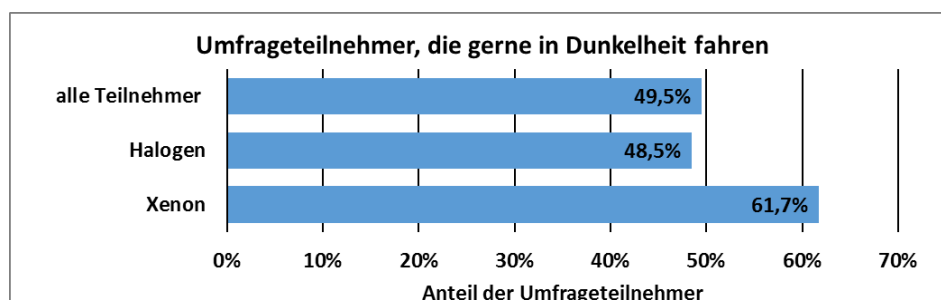


Abbildung 3.15: Umfrageteilnehmer, die gerne in Dunkelheit fahren [A105]&[A202]

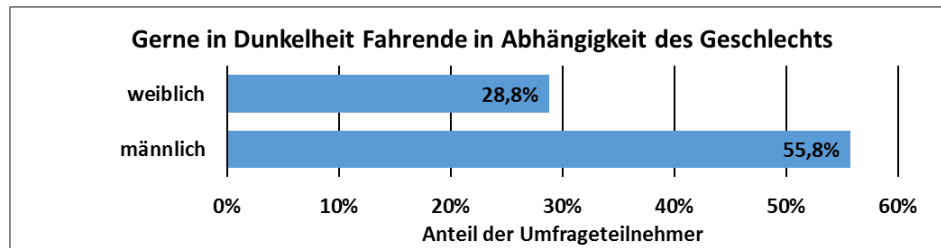


Abbildung 3.16: Gerne in Dunkelheit Fahrende in Abhängigkeit des Geschlechts [A105]&[A002]

Abbildung 3.17 zeigt den Anteil der Umfrageteilnehmer, die sich bessere Sicht bei Dunkelheitsfahren wünschen. Zusätzlich sind hier auch die Anteile der Teilnehmer mit Halogen- und Xenonscheinwerfern aufgeführt. Interessant ist hierbei, dass sich die Anteile der Teilnehmer mit Halogen- und Xenonscheinwerfern nicht unterscheiden. Hierbei sagen etwa 84 % beider Gruppen, dass sie sich eine bessere Sicht bei Dunkelheitsfahren wünschen. Demnach wünschen sich die Teilnehmer unabhängig von ihrer Ausgangsposition im gleichen Maße eine bessere Sicht bei Dunkelheitsfahrten.

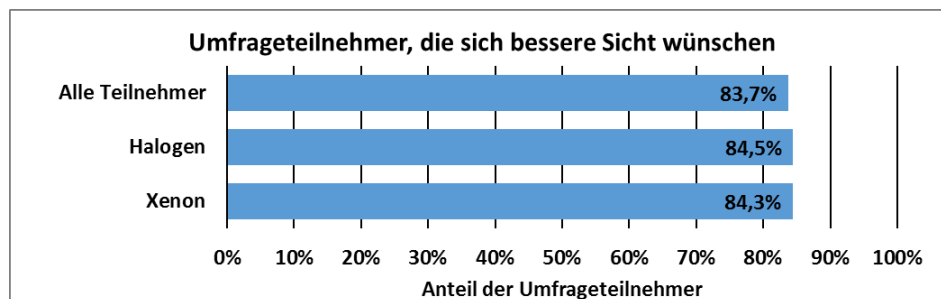


Abbildung 3.17: Wunsch nach besserer Sicht bei Dunkelheitsfahrten [A106]

In Abbildung 3.18 ist der Anteil der gerne in Dunkelheit fahrenden Teilnehmer gegenüber dem Teilnehmeralter aufgetragen. Hierbei repräsentiert jeder dargestellte Datenpunkt jeweils das mittlere Alter von 73 Teilnehmern (letzter Punkt 71 Teilnehmer) und den Anteil dieser Teilnehmer, die gerne in Dunkelheit fahren. Die Abbildung zeigt, dass mit steigendem Alter der Anteil an Teilnehmern, die gerne in Dunkelheit fahren, tendenziell sinkt. In dem jüngsten Alterscluster fahren noch ca. 60 % aller Teilnehmer gerne in Dunkelheit. In dem ältesten Alterscluster fahren hingegen nur noch 40 % der Teilnehmer gerne in Dunkelheit.

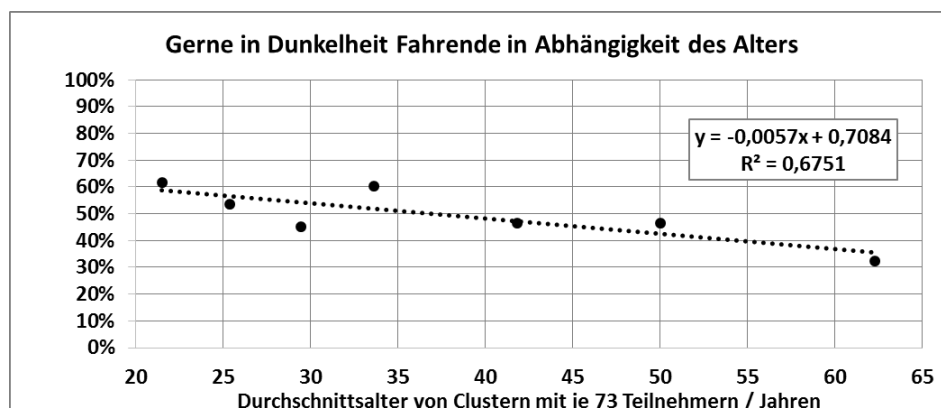


Abbildung 3.18: Gerne in Dunkelheit Fahrende in Abhängigkeit des Alters [A105]&[A001]

Abbildung 3.19 zeigt die Stressvervielfältigung der Teilnehmer bei Dunkelheitsfahrten. Betrachtet man alle Teilnehmer, so geben die meisten Teilnehmer (43,4 %) an, doppelt so viel Stress bei Dunkelheitsfahrten wie bei Tagfahrten zu empfinden. Zusätzlich ist in dieser Abbildung auch die Stressvervielfältigung der

Teilnehmer mit Halogen- und Xenonscheinwerfern aufgetragen. Hierbei ist zu sehen, dass die meisten Teilnehmer mit Halogenscheinwerfern ebenso wie die Gruppe aller Teilnehmer angeben, bei Dunkelheitsfahrten eine Verdoppelung von Stress zu empfinden. Teilnehmer mit Xenonscheinwerfern hingegen geben zumeist an, den gleichen Stress wie bei Tagfahrten zu empfinden.

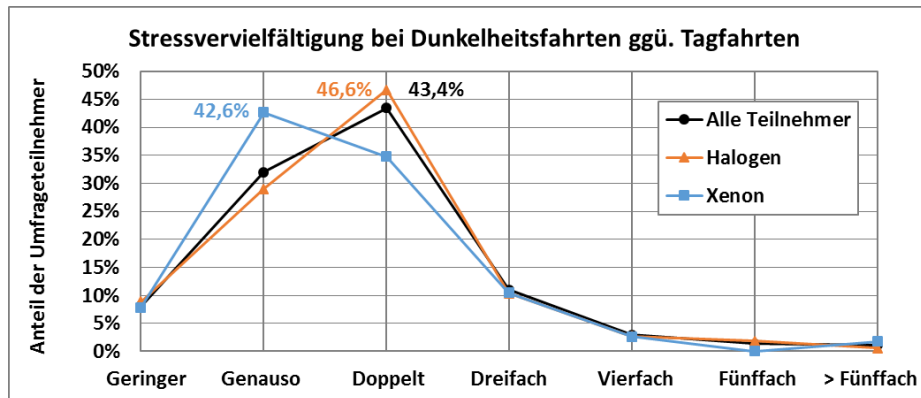


Abbildung 3.19: Stressvervielfältigung bei Dunkelheitsfahrten [A107]

In Abbildung 3.20 sind die mittleren Häufigkeiten der vier aufgelisteten Störfaktoren bei Dunkelheitsfahrten angegeben. Hierbei stellt sich klar heraus, dass Blendung durch andere Fahrzeuge die Teilnehmer am häufigsten bei Dunkelheitsfahrten stört. Gefolgt wird dieser Störfaktor von schlechter Sicht bei Dunkelheitsfahrten. Blendung durch Straßenbeleuchtung wird im Mittel nur als selten störend empfunden.

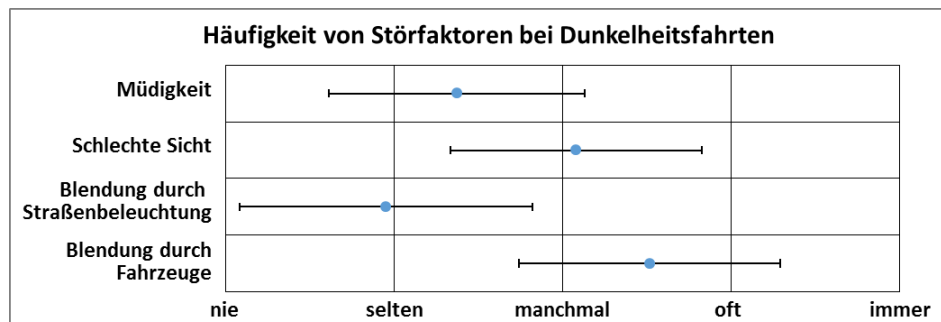


Abbildung 3.20: Häufigkeit von Störfaktoren [A114]

3.3.4 Wahrnehmung von Blendung

In diesem Kapitel wird die Wahrnehmung der Teilnehmer hinsichtlich Blendung im Straßenverkehr beschrieben. Dies beinhaltet unter anderem Störfaktoren, Lampentypen, Witterungs- und Straßenbedingungen.

Die folgende Abbildung 3.21 zeigt die Häufigkeit, mit der sich die Teilnehmer im Straßenverkehr geblendet fühlen. Hierbei ist zunächst ersichtlich, dass keine der Teilnehmer angeben, sich nie geblendet zu fühlen. Mit einem Wert von 48,1 % geben die meisten Teilnehmer an, sich manchmal geblendet zu fühlen. Mit einem Wert von knapp 30 % gibt die zweitgrößte Gruppe der Teilnehmer an, sich oft geblendet zu fühlen. Selten geblendet fühlen sich 20,4 % der Teilnehmer. In Abbildung 3.22 ist die mittlere Häufigkeit von Blendung im Straßenverkehr aufgeteilt nach männlichen und weiblichen Teilnehmern. Hierbei ist eine Tendenz sichtbar, dass Frauen sich etwas häufiger im Straßenverkehr geblendet fühlen.

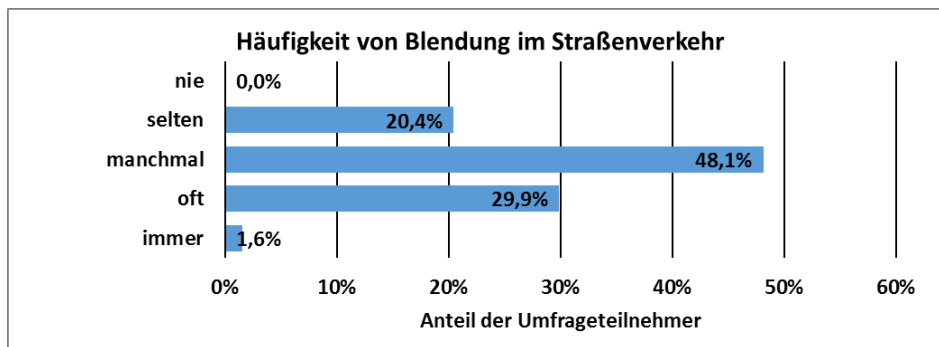


Abbildung 3.21: Häufigkeit von Blendung [A333]

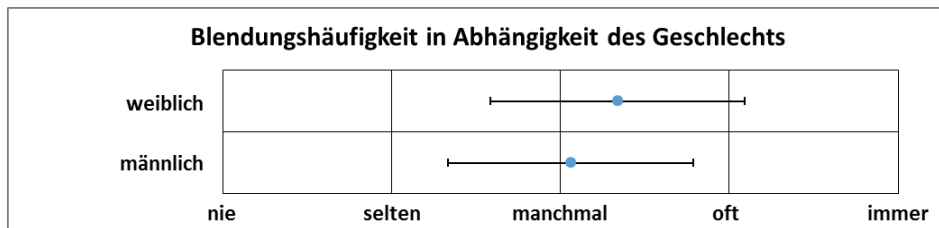


Abbildung 3.22: Häufigkeit von Blendung in Abhängigkeit des Geschlechts [A333]&[A002]

In Abbildung 3.23 ist die Häufigkeit der Blendung der Teilnehmer gegenüber dem Teilnehmeralter aufgetragen. Hierbei repräsentiert jeder dargestellte Datenpunkt jeweils das mittlere Alter von 73 Teilnehmern (letzter Punkt 71 Teilnehmer) und die mittlere Häufigkeit, mit der sich die Teilnehmer im Straßenverkehr geblendet fühlen. Die Abbildung zeigt, dass sich die Teilnehmer mit steigendem Alter tendenziell häufiger geblendet fühlen.

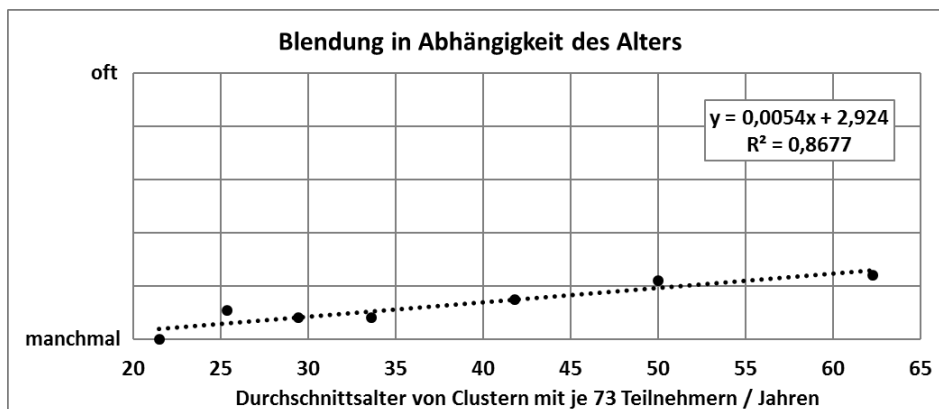


Abbildung 3.23: Häufigkeit von Blendung in Abhängigkeit des Alters [A333]&[A001]

In Abbildung 3.24 sind vier durch Blendung bedingte Störfaktoren inklusive der Häufigkeit, mit der sie unter den Teilnehmern bei Blendung auftreten, aufgelistet. Die Teilnehmer geben hierbei an, bei Blendung am häufigsten unter schlechter Sicht zu leiden. Am zweithäufigsten geben die Teilnehmer an, durch Blendung vom Straßenverkehr abgelenkt zu werden. Ein auftretendes Unwohlsein stellt sich als dritthäufigster Störfaktor heraus. In Abbildung 3.25 sind die Ergebnisse einer Kontrollfrage aufgelistet. Hierbei wurde die Frage, deren Ergebnisse in Abbildung 3.24 dargestellt sind, in modifizierter Weise (anderer Fragetyp) nochmal im Fragebogen gestellt. Die Kontrollfrage war vom Typ 3 (vgl. Kapitel 3.2), demnach mussten die Teilnehmer eine Rangordnung der Störfaktoren festlegen. Abbildung 3.25 zeigt hierbei die Häufigkeit der auf Rangplatz 1 genannten Störfaktoren. Es zeigt sich deutlich, dass auch hier eine physiologische Einschränkung der Sehfähigkeit als kritischster Störfaktor genannt wird. Beide Abbildungen zeigen demnach, dass die Teilnehmer sich eher durch eine physiologische Blendwirkung

(eingeschränkte Sicht, schlechte Objekterkennung) als durch eine psychologische Blendwirkung (Unwohlsein) gestört fühlen. Wobei anzumerken ist, dass bei einer Umfrage keine saubere Trennung von physiologischen und psychologischen Blendwirkungen erwartet werden kann.

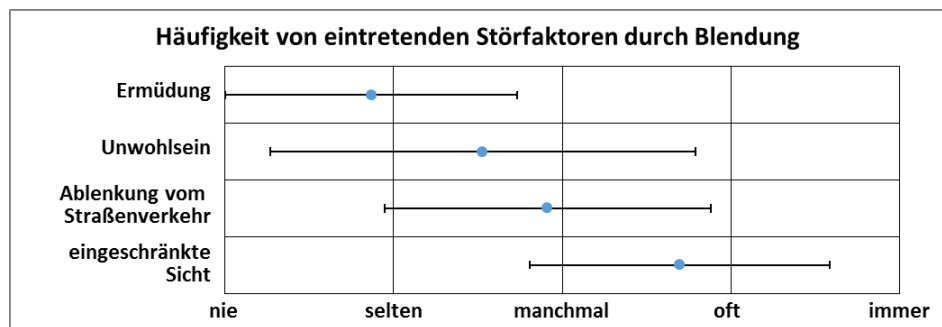


Abbildung 3.24: Häufigkeit von eintretenden Störfaktoren durch Blendung [A322]

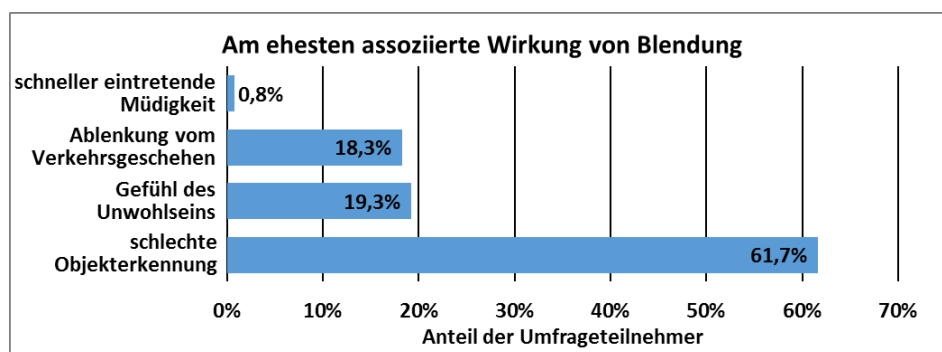


Abbildung 3.25: Am ehesten assoziierte Wirkung von Blendung [A316]

Abbildung 3.26 zeigt die Häufigkeit von Blendung in Abhängigkeit der Verkehrsteilnahme. Teilnehmer, die LKW fahren, geben hierbei an, im Mittel selten geblendet zu werden, was sich sicher durch die relative hohe Sitzposition erklären lässt. Am häufigsten werden die Teilnehmer geblendet, wenn sie einen PKW fahren. Am zweithäufigsten kommt es bei den Teilnehmern zu einer Blendung, wenn sie ein Fahrrad fahren.

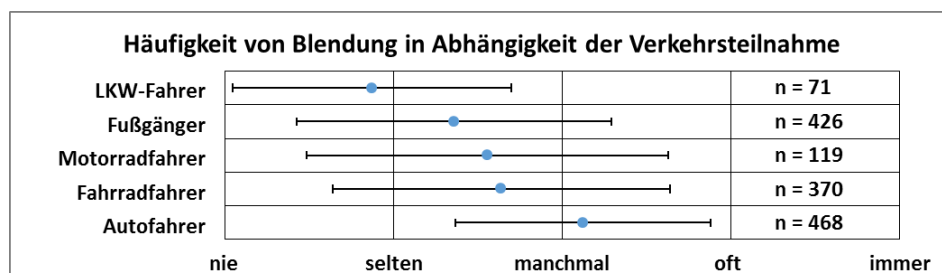


Abbildung 3.26: Häufigkeit von Blendung in Abhängigkeit der Verkehrsteilnahme [A330]

Die folgenden beiden Abbildungen beinhalten Ergebnisse von Fragen des Typs 3. Demnach mussten die Teilnehmer eine Rangfolge aus gegebenen Parametern bilden. Abbildung 3.27 zeigt hierbei die Häufigkeit von am ehesten mit Blendung assoziierten Lampentypen und Abbildung 3.28 die Häufigkeit von am ehesten mit Blendung assoziierten Farben. In beiden Abbildungen ist hierbei die Häufigkeit der Nennung der Parameter auf Rangplatz 1 dargestellt. Abbildung 3.27 zeigt, dass der Lampentyp Xenon mit einem Anteil von 69,4 % deutlich am häufigsten auf Rangplatz 1 gesetzt wurde. Hinsichtlich der mit Blendung assoziierten Farben wurde die Farbe Blau mit einem Anteil von 52,8 % am häufigsten auf Rangplatz 1 gesetzt. Am zweithäufigsten setzten 33,6 % aller Teilnehmer die Farbe Gelb auf Rangplatz 1.

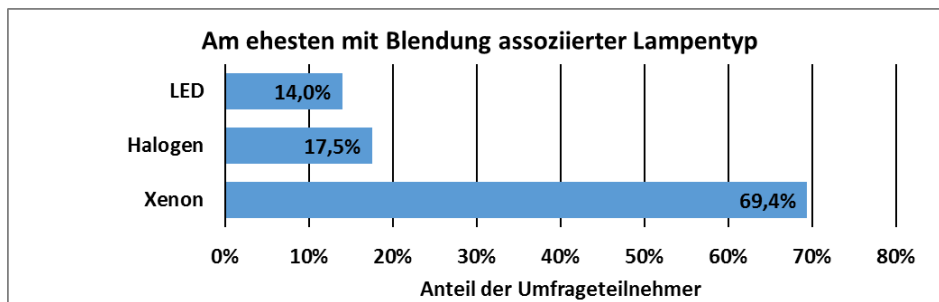


Abbildung 3.27: Am ehesten mit Blendung assoziierter Lampentyp [A304]

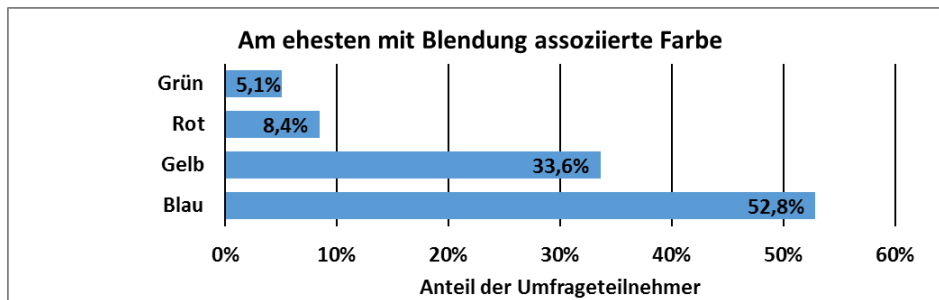


Abbildung 3.28: Am ehesten mit Blendung assoziierte Farbe [A303]

Abbildung 3.29 zeigt das von den Teilnehmern erwartete Verhalten von hochmodernen Scheinwerfern hinsichtlich einer Blendung anderer Verkehrsteilnehmer. Hierbei zeigt sich, dass mit 40,7 % die größte Gruppe der Teilnehmer erwartet, dass es zu einer Erhöhung der Blendung Anderer kommt. Mit 37,1 % erwartet ein fast ebenso großer Teil, dass es zu einer Verringerung kommt. Dieses Ergebnis ist insgesamt enttäuschend, da es das Ziel sein muss, dass hochmoderne Scheinwerfer nicht mit einer Erhöhung, sondern viel mehr mit einer Verringerung der Blendung anderer Teilnehmer in Verbindung gebracht werden.

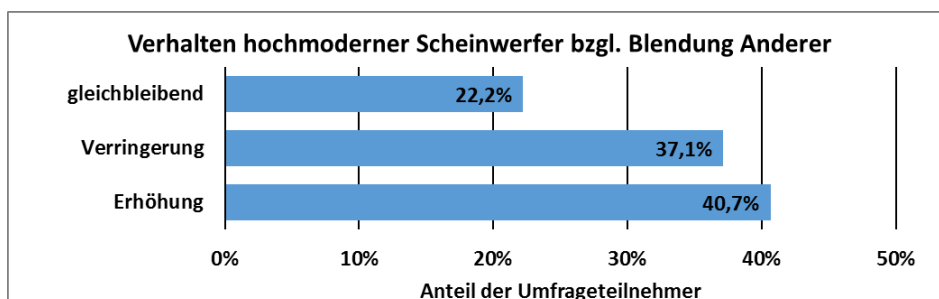


Abbildung 3.29: Verhalten hochmoderner Scheinwerfer bezüglich Blendung Anderer [A319]

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Häufigkeit von auftretender Blendung unter verschiedenen Verkehrsbedingungen. Abbildung 3.30 zeigt hierbei, dass sich die Teilnehmer im Vergleich zu einer niedrigen Verkehrsdichte häufiger bei einer hohen Verkehrsdichte geblendet fühlen. Abbildung 3.31 zeigt, dass sich die Teilnehmer häufiger durch Gegenverkehr als durch Folgeverkehr geblendet fühlen.

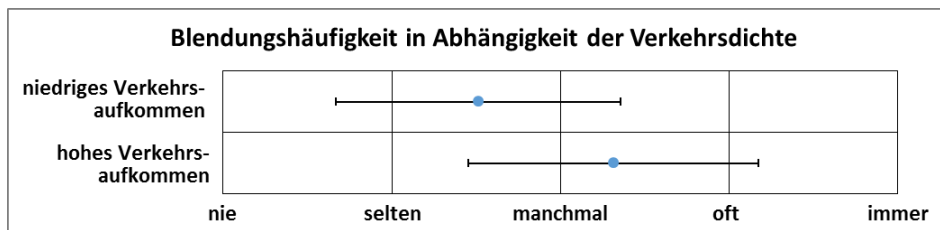


Abbildung 3.30: Häufigkeit von Blendung in Abhängigkeit der Verkehrsdichte [A329]

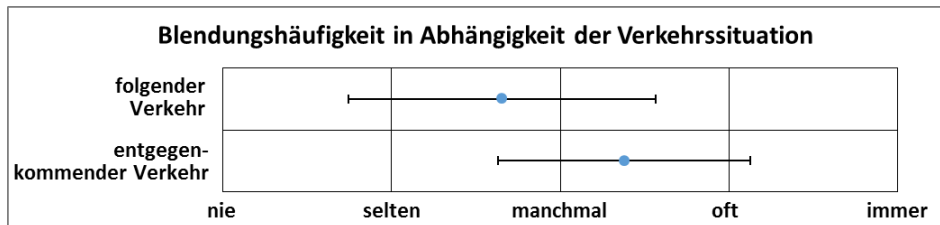


Abbildung 3.31: Häufigkeit von Blendung in Abhängigkeit der Verkehrssituation [A323]

In Abbildung 3.32 ist die Häufigkeit von Gegenverkehrsblendung und in Abbildung 3.33 die Häufigkeit von Folgeverkehrsblendung nach Straßentyp aufgetragen. Im Vergleich zu Autobahnen und Fahrten in Ortschaften fühlen sich die Teilnehmer bei Gegenverkehr eindeutig am häufigsten auf der Landstraße geblendet. Betrachtet man die Blendung durch Folgeverkehr, so ist zu sehen, dass die Häufigkeit der Blendung auf Landstraßen und in Ortschaften im Vergleich zur Gegenverkehrssituation im Mittel sinkt. Die Häufigkeit der Blendung auf Autobahnen hingegen steigt im Vergleich zur Gegenverkehrssituation. Das gegensätzliche Verhalten der Autobahn lässt sich sicher dadurch erklären, dass hier meist ein Mittelstreifen vorhanden ist, was dazu führt, dass die Scheinwerfer des Gegenverkehrs kaum und die Scheinwerfer des Folgeverkehrs isolierter wahrgenommen werden. Zusätzlich kann auf der Autobahn der Folgeverkehr auch auf einer nach links versetzten Spur fahren, was auf Grund des ansteigenden Astes der Hell-Dunkel-Grenze zu einer erhöhten Blendung führen kann.

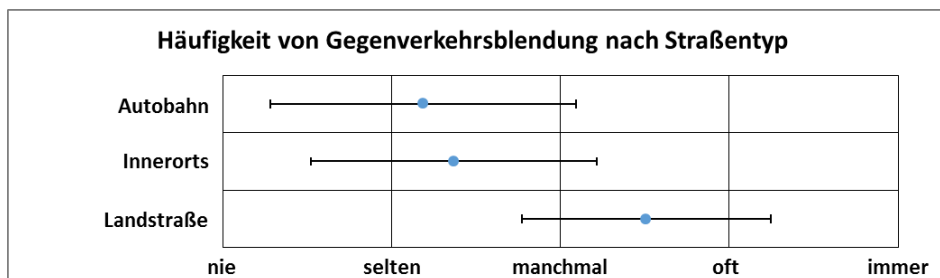


Abbildung 3.32: Häufigkeit von Gegenverkehrsblendung nach Straßentyp [A324]

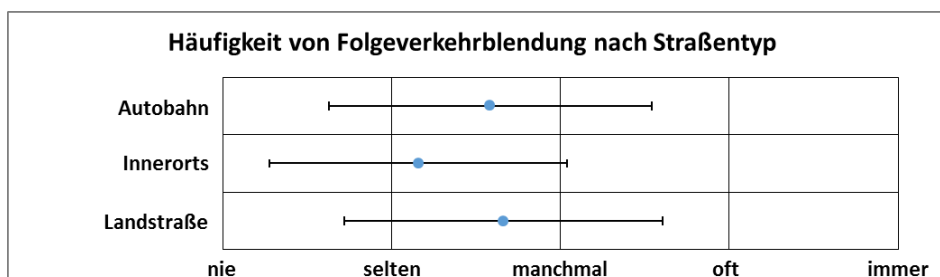


Abbildung 3.33: Häufigkeit von Folgeverkehrsblendung nach Straßentyp [A331]

Abbildung 3.34 zeigt die mit Blendung am ehesten assoziierten Witterungstypen. Hierbei handelt es sich um Ergebnisse einer Frage von Typ 3 (vgl. Kapitel 3.2). In der Abbildungen ist die Häufigkeit der Nennung

der Witterungstypen auf Rangplatz 1 dargestellt. Hierbei zeigt sich deutlich, dass mit 72,3 % die meisten Teilnehmer den Witterungstyp „Regen und nasse Fahrbahn“ am ehesten mit Blendung in Verbindung setzen. Gefolgt wird dieser Witterungstyp von dem Witterungstyp „kein Regen, nasse Fahrbahn“, wobei hier nur ein relativ geringer Anteil von 14,3 % aller Teilnehmer diesen Witterungstyp am ehesten mit Blendung in Verbindung setzen.

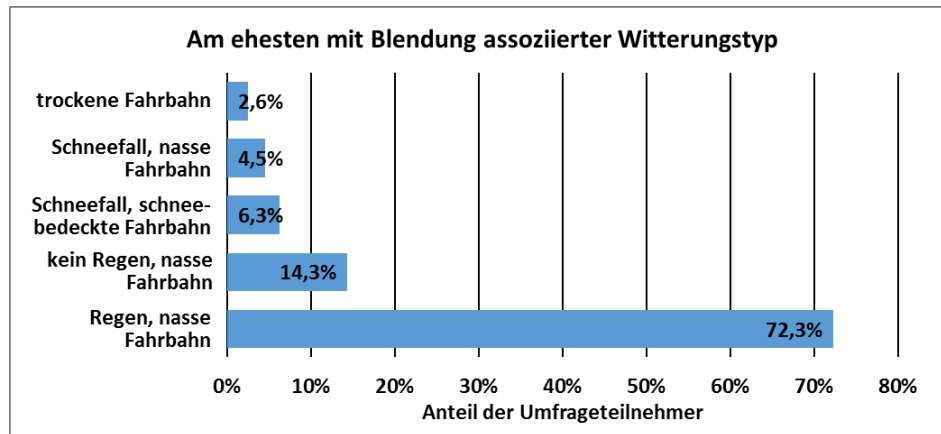


Abbildung 3.34: Am ehesten mit Blendung assoziierter Witterungstyp [A332]

3.3.5 Gefahrensituationen durch Blendung

Dieses Kapitel beschreibt die Wahrnehmung der Teilnehmer von Gefahrensituationen, welche durch Blendung verursacht werden.

Abbildung 3.35 zeigt die Häufigkeit, mit der die Teilnehmer durch Blendung in eine gefährliche Situation gekommen sind. Es zeigt sich hierbei, dass 36 % aller Teilnehmer noch nie und demnach 64 % aller Teilnehmer schon mindestens einmal in eine gefährliche Situation durch Blendung gekommen sind. Am häufigsten geben die Teilnehmer an, selten in eine gefährliche Situation gekommen zu sein.

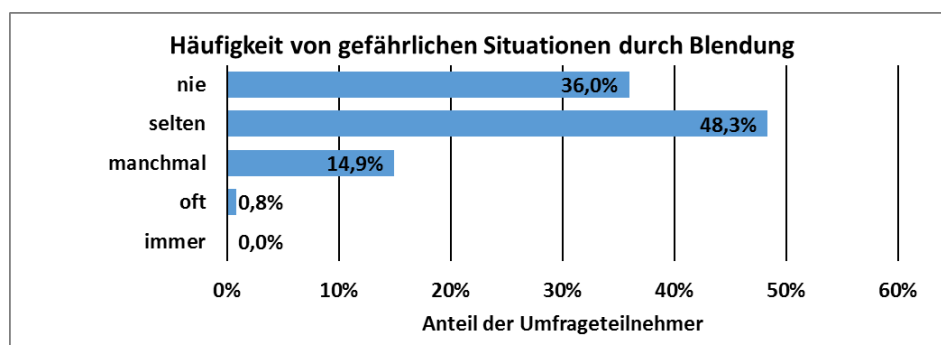


Abbildung 3.35: Häufigkeit von gefährlichen Situationen durch Blendung [A310]

Insgesamt geben vier Teilnehmer an, schon einmal in einen durch Blendung verursachten Unfall geraten zu sein. Wobei es sich hierbei einmal um einen Wild- und Sachschaden, einmal um einem Personenschaden und zweimal um einen Personen- und Sachschaden handelt.

Abbildung 3.36 zeigt den Anteil aller Teilnehmer, die definierte Gefahrensituationen erlebt haben. Es zeigt sich hierbei, dass mit einem Anteil von 50 % die Teilnehmer am häufigsten angeben, durch Blendung den Straßenverlauf falsch eingeschätzt zu haben. Etwa 20 % aller Teilnehmer geben an, dass sie durch

Blendung eine Person übersehen oder spät erkannt haben. Knapp 18 % aller Teilnehmer haben ein Fahrrad übersehen, bzw. spät erkannt.

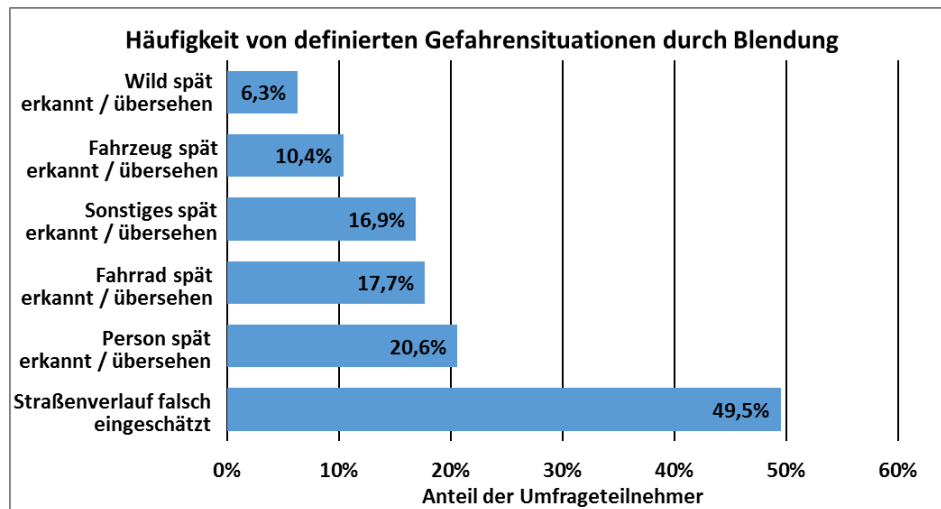


Abbildung 3.36: Häufigkeit von definierten Gefahrensituationen durch Blendung [A312]

3.4 Fazit

Die hier beschriebene Umfrage hatte das Ziel, die Wahrnehmung von Blendung im Straßenverkehr zu untersuchen. Ein zusätzliches Ziel war die Wahrnehmung von Dunkelheitsfahrten und Scheinwerfern zu untersuchen. Die Umfrageergebnisse basieren hierbei auf den Datensätzen von 509 Teilnehmern, von denen 96,5 % hauptsächlich PKW fahren.

Bezüglich der Lichtassistenzsysteme zeigt sich, dass die Zufriedenheit mit den Systemen tendenziell mit dem Funktionsumfang bzw. der Komplexität der Systeme steigt. Hinsichtlich der Lampentypen zeigt sich, dass die Teilnehmer mit Xenonscheinwerfern im Mittel zufriedener mit ihrem Lampentyp sind als Teilnehmer mit Halogenscheinwerfern. Dennoch wünschen sich unabhängig vom Lampentyp etwa 84 % aller Teilnehmer eine bessere Sicht bei Dunkelheitsfahrten. Für eine deutliche Sichtverbesserung bei Nachtfahrten sind 22,3 % der Teilnehmer bereit 500 € zu bezahlen. Ein Anteil von 18,7 % ist auch bereit mehr zu zahlen, die restlichen Teilnehmer würden nur einen Aufpreis von weniger als 500 € zahlen. Im Vergleich zu den Teilnehmern mit Halogenscheinwerfern fährt ein deutlich größerer Anteil der Teilnehmer mit Xenonscheinwerfern gerne in Dunkelheit (Xenon: 61,7 % zu Halogen: 48,5 %). Zusätzlich zeigt sich, dass der Hauptanteil der Teilnehmer mit Xenonscheinwerfern sich bei Nachtfahrten genauso gestresst fühlt wie bei Tagfahrten. Bei den Teilnehmern mit Halogenscheinwerfern hingegen fühlt sich der Hauptanteil bei Dunkelheitsfahrten doppelt so gestresst wie bei Tagfahrten. Diese Ergebnisse führen zu der Vermutung, dass Xenonscheinwerfer einen positiven Einfluss auf den Stress und die Fahrfreude bei Dunkelheitsfahrten haben. Mehr als eine Vermutung kann man hier aber nicht äußern, denn so ist z.B. ein Fahrzeug mit Xenonscheinwerfern im Vergleich zu einem Fahrzeug mit Halogenscheinwerfern vermutlich auch oft das hochwertigere und komfortablere Fahrzeug.

Hinsichtlich Dunkelheitsfahrten zeigt sich, dass etwa die Hälfte der Teilnehmer oft in Dunkelheit fährt, wobei etwa auch die Hälfte aller Teilnehmer nicht gerne in Dunkelheit fährt. Der von den Teilnehmern am häufigsten in Dunkelheit befahrene Straßentyp ist die Landstraße, gefolgt von Ortsstraßen und Autobahnen.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass Blendung ein äußerst kritischer Störfaktor im Straßenverkehr ist. So geben die Teilnehmer an, dass der am häufigsten vorkommende Störfaktor bei Dunkelheitsfahrten eine Blendung durch andere Fahrzeuge ist (manchmal bis oft). Blendung durch Straßenbeleuchtung wird durch die Teilnehmer als eher selten vorkommend beschrieben. Müssen sich die Teilnehmer für einen am meisten blendenden Lampentyp entscheiden, dann wählen mit einem Anteil von 69,4 % die meisten Teilnehmer die Xenonlampe. Hinsichtlich einer am ehesten mit Blendung assoziierten Farbe wählen mit einem Anteil von 52,8 % die meisten Teilnehmer die Farbe Blau. Generell fühlt sich die größte Gruppe der Teilnehmer manchmal geblendet (48,1 % aller Teilnehmer). Die zweitgrößte Gruppe mit 29,9 % aller Teilnehmer fühlt sich oft geblendet. Kein Teilnehmer gibt an, sich nie geblendet zu fühlen. Hinsichtlich Störgrößen, die durch Blendung verursacht werden, ergibt sich, dass sich die Teilnehmer eher durch eine physiologische Blendwirkung (eingeschränkte Sicht, schlechte Objekterkennung) als durch eine psychologische Blendwirkung (Unwohlsein) gestört fühlen. Bezüglich der Verkehrssituation fühlen sich die Teilnehmer am häufigsten von entgegenkommendem Verkehr auf Landstraßen geblendet. Mit einem Anteil von 72,3 % gibt der größte Teil aller Teilnehmer an, den Witterungstyp Regen und nasse Fahrbahn am ehesten mit Blendung in Verbindung zu setzen. Insgesamt sind 64 % aller Teilnehmer schon einmal in eine gefährliche Situation, welche durch Blendung verursacht wurde, geraten. Hinsichtlich durch Blendung verursachter Gefahrensituationen geben die Teilnehmer am häufigsten an, den Straßenverlauf falsch eingeschätzt zu haben (49,5 % aller Teilnehmer). Die am zweithäufigsten genannte Gefahrensituation, in die Teilnehmer durch Blendung geraten sind, ist das Übersehen bzw. zu späte Erkennen von Personen (20,6 % aller Teilnehmer). Vier Teilnehmer geben an, dass sie in einen durch Blendung verursachten Unfall geraten sind, wobei es bei drei der Unfälle zu einem Personenschaden gekommen ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Vergleich zu den männlichen Teilnehmern ein deutlich geringerer Anteil der weiblichen Teilnehmer gerne in Dunkelheit fährt. Zusätzlich zeigt sich, dass sich die weiblichen Teilnehmer tendenziell häufiger geblendet fühlen.

Hinsichtlich der Altersabhängigkeit der Ergebnisse zeigt sich, dass sich die Teilnehmer mit steigendem Alter häufiger geblendet fühlen und der Anteil der gerne in Dunkelheit fahrenden Teilnehmer tendenziell sinkt.

Die Ergebnisse der Umfrage machen deutlich, dass eine von Fahrzeugscheinwerfern verursachte Blendung ein ernstzunehmender Störfaktor bei Dunkelheitsfahrten ist. Hierbei zeigt sich, dass die Teilnehmer hochwertige Scheinwerfersysteme und Xenonlampen eher mit einer Vergrößerung der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer in Verbindung setzen. Es ist demnach äußerst wichtig, neuartige Scheinwerfersysteme hinsichtlich ihrer Detektionsleistung, aber auch hinsichtlich ihrer Blendung zu quantifizieren, um so emotionsfreie und objektiv belastbare Aussagen treffen zu können.

4 Blendung und Detektionsdistanz von blendfreiem Fernlicht

4.1 Einleitung

Die in Kapitel 3 beschriebenen Umfrageergebnisse haben gezeigt, dass sich über 80 % aller Teilnehmer, unabhängig von der Art der Lichtquelle ihres Fahrzeuges, eine bessere Sicht bei Nachtfahrten wünschen. Zusätzlich belegen die Umfrageergebnisse aber auch, dass Blendung durch andere Fahrzeuge ein ernstzunehmendes Problem im Straßenverkehr ist. Die Umfrageergebnisse zeigen demnach, dass auf der einen Seite ein eindeutiger Bedarf nach besserer Sicht bei Nachtfahrten existiert und auf der anderen Seite hingegen aber auf keinen Fall die Blendung im Verkehrsraum erhöht, sondern eher reduziert werden sollte. Die Umfrageergebnisse unterstreichen und betonen demnach den Bedarf nach neuen Scheinwerfersystemen, die es dem Fahrer ermöglichen, signifikant besser sehen zu können, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Das in Kapitel 2.2.2.2 beschriebene blendfreie Fernlicht ist das aktuell fortschrittlichste Konzept eines adaptiven Scheinwerfersystems. Das System wurde im Jahr 2010 in den Fahrzeugmarkt eingeführt und verspricht „blendfrei“ genau diesem Bedarf nach besserer Sicht gerecht zu werden. Der im Folgenden beschriebene Feldtest wurde durchgeführt, um objektive Daten zu gewinnen, die ein solches Scheinwerfersystem unter möglichst realistischen Bedingungen charakterisieren, um somit zu klären ob die Bezeichnung blendfreies Fernlicht gerechtfertigt ist. Zusätzlich wurden in dem Feldtest die Unterschiede von Xenon- und Halogenscheinwerfern untersucht.

Vor der Erläuterung der Methodik und der Ergebnisse des Feldtestes wird in dem folgenden Unterkapitel ein Überblick über verschiedene Untersuchungen gegeben, die sich schon mit einer ähnlichen Fragestellung beschäftigt haben.

Die Ergebnisse des Feldtests wurden auf dem International Symposium on Automotive Lighting (Abk.: ISAL) 2013 [46] und in der Automobiltechnischen Zeitschrift (Abk.: ATZ) Ausgabe 6/2014 [47] veröffentlicht. Teile dieses Kapitels sind aus dem ATZ-Artikel übernommen. Der Feldtest wurde durch die CLEPA Light Sight Safety Initiative finanziell unterstützt.

4.2 Stand der Forschung

Im Folgenden wird auf einige Untersuchungen eingegangen, die sich in Feldtests mit Scheinwerfersystemen hinsichtlich den Themen Blendung und Detektionsdistanz unter möglichst realistischen Bedingungen beschäftigt haben. Hierbei konzentriert sich diese Auswahl hauptsächlich auf Untersuchungen, die zumindest teildynamisch ausgelegt und nicht unter künstlichen Laborbedingungen durchgeführt wurden. Teildynamisch bedeutet hierbei, dass sich entweder der Proband oder die Blendquelle mit einer gewissen Geschwindigkeit bewegen.

SCHMIDT-CLAUSEN hat 1985 die Ergebnisse eines Feldtests veröffentlicht, bei dem er für verschiedene Halogen Abblendlichtscheinwerfer die Detektionsdistanz ermittelte [48]. Als Detektionsobjekte kamen u. a. Dummies mit Fußgänger-Silhouette zum Einsatz. Hierbei hatten die Dummies Reflexionsgrade von 5%, 14% und 31%. Über die Größe der Dummies wird keine Aussage gemacht. Für die Aufnahme der Detektionsdistanz ließ SCHMIDT-CLAUSEN insgesamt acht Probanden mit Geschwindigkeiten von 50 – 70 km/h eine gerade Strecke entlangfahren, wobei die Detektionsobjekte am rechten und linken Fahrbahnrand positioniert wurden. Die Position der Detektionsobjekte wurde nach einer bestimmten

Anzahl an Fahrten verändert. Für Dummies am rechten Fahrbahnrand und den besten Abblendlichtscheinwerfer ergaben sich etwa (aus Grafiken in der Veröffentlichung abgelesen) die folgenden mittleren Detektionsdistanzen: 35 m (5%), 62 m (14%) und 80 m (31%). Der beste Scheinwerfer hinsichtlich Detektionsdistanz ist hierbei aber auch der Scheinwerfer, der die höchste Blendbeleuchtungsstärke generiert.

SPRUTE führte einen Feldtest durch zur Bestimmung einer geeigneten Abblendentfernung für Fernlichtassistenten [20], [49]. Hierbei wurde das Head-Up-Display (Abk. HUD) eines Fahrzeuges so umgebaut, dass auf diesem eine Kontrastsehaufgabe dargestellt werden konnte [50]. Während die Probanden kontinuierlich die Sehaufgabe zu lösen hatten, fuhren sie mit 80 km/h auf ein Fahrzeug mit Xenonscheinwerfern zu, welches entweder Fernlicht oder Abblendlicht aktiviert hatte. Die Sehaufgabe bestand darin, kontinuierlich die sich verändernde Lage eines Rechteckes im HUD zu erkennen (rechts, mittig, links). Der Kontrast der Sehaufgabe wurde nach jeder Fahrt verändert und war während einer Fahrt konstant gehalten. Bei jeder Fahrt ergab sich so je nach Kontrast eine gewisse Distanz, ab der auf Grund von Blendung die Rechtecke nicht mehr erkannt werden konnten. Mit dieser Methode konnte SPRUTE einen abstandsabhängigen Schwellenkontrast für Fernlicht und Abblendlicht bestimmen. Zur Bestimmung einer Abblendentfernung für einen Fernlichtassistenten hat er nun zunächst den Schwellenkontrast bei einem Abstand von 50 m bei Abblendlicht betrachtet. Der Abstand, der sich bei Fernlicht für diesen Schwellenkontrast ergab, war 400 m und wurde als empfohlene Abblendentfernung festgelegt (vgl. Abbildung 4.1). SPRUTE stellte demnach fest, dass die physiologische Blendung von Fernlicht bei Distanzen unter 400 m die physiologische Blendung bei 50 m und Abblendlicht überschreitet. Der Abblendlicht-Vergleichswert wurde bei einem Abstand von 50 m gewählt, da sich hier, z.B. nach DE BOER und SCHMIDT-CLAUSEN [51], die geringste Sichtbarkeitsentfernung bei der Begegnung zweier Fahrzeuge einstellt.

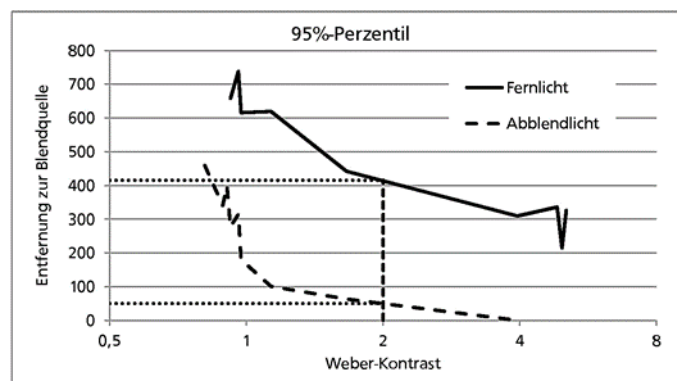


Abbildung 4.1: Ableitung der Abblendentfernung aus dem Schwellenkontrast [20]

SPRUTE und HUMMEL führten einen Feldtest durch zur Bestimmung der Detektionsdistanz verschiedener Scheinwerfersysteme [20] [52]. Sie positionierten hierbei verschiedene Sichtziele auf einem Testparcour. Sichtziele waren hierbei u. a. personenförmige Sperrholztäfel in zwei unterschiedlichen Größen (Frau mit 1,6 m und Kind mit 0,8 m) mit einem Reflexionsgrad von etwa 16 % (heller Jeansstoff). Die personenförmigen Sichtziele wurden an den rechten Straßenrand gestellt. Als Blendquellen wurden Scheinwerferracks mit Halogen-, Xenon- und LED-Scheinwerfern mit aktiviertem Abblendlicht als Gegenverkehr positioniert. Hierbei standen die Scheinwerferracks jeweils auf der Höhe der größeren Sperrholztäfel, und 100 m hinter dem jeweiligen Scheinwerferrack wurde die kleinere Sperrholztäfel aufgestellt. Die insgesamt 29 Probanden sind mit verschiedenen Lichtsystemen und einer Richtgeschwindigkeit von 80 km/h den Testparcours entlanggefahren und hatten die Aufgabe, einen Taster zu drücken, sobald ein Sichtziel erkannt wurde. Die gefahrenen Lichtsysteme waren u. a. zwei Arten von blendfreiem Fernlicht (Prototypen: LED Matrix Beam und Xenon mit maskiertem Dauerfernlicht) und

Xenon Abblendlicht. SPRUTE schildert in seiner Arbeit [20], dass das Testdesign das Problem des Lerneffektes der Probanden hinsichtlich der Sehzeichenpositionen vernachlässigte. Zusätzlich schildert er, dass die geraden Streckenabschnitte zu kurz gehalten waren. Bei alleiniger Betrachtung der ersten Fahrten der Probanden kommt er im Vergleich zu Xenon Abblendlicht auf eine Steigerung der Detektionsdistanz durch blendfreies Fernlicht von ca. 16 m.

TOTZAUER und WINDHOFF gestalteten einen Feldtest zur Bestimmung der Blendung und Irritation des Gegenverkehrs durch einen LED Matrix Beam Scheinwerfer [42] [53] [54]. Hierbei fuhren die Probanden mit einer Geschwindigkeit von 60 km/h auf das stehende MatrixBeam Fahrzeug zu und bewerteten kontinuierlich ihren Blendeindruck anhand der de Boer Skala. Die subjektiven Eindrücke wurden nach bestimmten Fahrten durch den Testleiter anhand eines Fragenkataloges abgefragt. Jeder Proband fuhr sieben Mal auf das stehende MatrixBeam Fahrzeug zu. Hierbei wurde nach jeder Fahrt das Lichtsystem des Matrix Beam Fahrzeuges umgestellt. Die Umstellung bezog sich dabei auf entweder die Lückenbreite des blendfreien Fernlichtes oder die grundlegende Verteilung der Scheinwerfer: Abblendlicht/Fernlichtassistent, blendfreies Fernlicht, Fernlicht. Die Untersuchung zeigte, dass bei trockenen Witterungsverhältnissen das Schaltverhalten des blendfreien Fernlichtes als „gar nicht“ störend empfunden wurde. Eine etwas größere Störung ergab sich dagegen bei etwa der Hälfte der Probanden bei leicht nebeligen Verhältnissen. Der Blendeindruck des blendfreien Fernlichtes wurde von mehr als der Hälfte der Probanden als „gleich gut“ wie der Blendeindruck durch Abblendlicht mit Fernlichtassistent bewertet. Fernlicht wurde dagegen im Vergleich zu Abblendlicht von den meisten Probanden als „sehr viel schlechter“ empfunden. TOTZAUER schlussfolgert am Ende seiner Auswertung, dass der „Blendeindruck innerhalb einer MatrixBeam-Lücke dem von einem modernen, guten Abblendlicht sehr stark ähnelt“ [42].

BÖHM und LOCHER statteten ein Testfahrzeug u. a. mit einem Photometer zur Bestimmung der Blendbeleuchtungsstärke und einem LIDAR (Abk. für engl. „light detection and ranging“) Sensor zur Bestimmung des Abstandes aus [55]. Bei einem Abstand von 50 m zu einem entgegenkommenden Fahrzeug wurde die Blendbeleuchtungsstärke aufgezeichnet und der Fahrer durch einen Ton darauf hingewiesen, eine Bewertung der psychologischen Blendung anhand der invertierten de Boer Skala abzugeben. Die Fahrten wurden auf Landstraßen unternommen, wobei insgesamt 807 gültige Datensätze entstanden. Die Auswertung der Daten ergab eine mittlere Blendbeleuchtungsstärke für alle Scheinwerfer von 0,43 lx, wobei die konkreten Werte für Halogen- und Xenonscheinwerfer nicht aufgeführt werden. Hinsichtlich der psychologischen Blendung schlussfolgern BÖHM und LOCHER, dass Blendbeleuchtungsstärken und de Boer Bewertungen nur moderat korrelieren.

BÖHM et al. führten einen statischen Test zur Bestimmung der Detektionsdistanz von Xenon Abblendlicht und gleitender Leuchtweite im Hella Lichttunnel in Lippstadt durch [56]. Der Test wird hier, obwohl er statisch ist, nur aufgeführt, da die Ergebnisse oft zitiert werden. Hierbei wurde zum einen ein Gegenverkehrsszenario und zum anderen ein Szenario mit vorausfahrendem Verkehr nachgestellt. Im Falle des Gegenverkehrs wurde ein Scheinwerferrack mit Abblendlichtscheinwerfern in 100 m Abstand aufgestellt. Im Falle des vorausfahrenden Verkehrs wurde ein Scheinwerferrack mit Rückleuchten in einem Abstand von 140 m positioniert. Der Detektionsabstand wurde durch 45 Probanden bestimmt, wobei diese die Aufgabe hatten, einen Fußgänger mit schwarzer Jacke, Jeans (Reflexionsgrad 16%) und schwarzen Schuhen zu erkennen. Der Fußgänger näherte sich den Probanden vom Ende des Lichttunnels in Meterschritten, wobei diese jeweils angeben mussten, ob sie den Fußgänger erkennen oder nicht. Der Fußgänger näherte sich im Falle des vorausfahrenden Verkehrs von der linken Straßenseite und im Falle des entgegenkommenden Verkehrs von der rechten Seite. In dem Test wurden bis zu 10 Probanden hinter einem Scheinwerferpaar, bei dem sich die Hell-Dunkel-Grenze in vertikaler Richtung verstellen ließ,

positioniert. Getestet wurden drei Entfernungen der Hell-Dunkel-Grenze: 75 m für Abblendlicht, 110 m für GLW mit entgegenkommendem Verkehr und 124 m für GLW mit vorausfahrendem Verkehr. Die sich ergebenden mittleren Detektionsdistanzen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Die Standardabweichung ist in Klammern dahinter angegeben.

Tabelle 4.1: Detektionsdistanzen nach BÖHM et al. [56]

Entgegenkommender Verkehr		Vorausfahrender Verkehr	
Abblendlicht	GLW	Abblendlicht	GLW
104,2 m ($\sigma = 6,9$ m)	134,6 m ($\sigma = 6,1$ m)	94,8 m ($\sigma = 7,9$ m)	124,8 m ($\sigma = 9,5$ m)

Eine ähnliche Laborstudie wurde auch von LOCHER und VÖLKER durchgeführt [57]. Bei ihnen kamen unterschiedliche Detektionsobjekte zum Einsatz. Die Versuche wurden ohne Blendquelle durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass gut erkennbare Objekte in einem Abstand von etwa 100 m und schlecht erkennbare Objekte in einem Abstand von etwa 55 m erkannt wurden. Zusätzlich zeigte sich ein deutlicher Unterschied je nach verwendeten Scheinwerfertypen.

ROSLAK hat im Rahmen seiner Dissertation einen DMD-Scheinwerfer (DMD für engl. „Digital Micromirror Device“) aufgebaut [58]. Das Ziel hierbei war es, mit dem Scheinwerfer neue Lichtfunktionen wie blendfreies Fernlicht zu untersuchen. Zur Verifikation des Forschungsscheinwerfers führte ROSLAK dynamische Probandenstudien durch, in denen er Probanden die psychologische Blendung von blendfreiem Fernlicht, bei ROSLAK „Aktives Licht“ genannt, bewerten ließ. Es stellte sich hierbei heraus, dass sobald das Lichtsystem die bewertenden Probanden erfasst und ausgeblendet hat, diese das System als etwa genauso wenig blendend wie Abblendlicht bewerten. Die Untersuchung einer Detektionsdistanz wurde nicht durchgeführt.

SCHNEIDER führte zur Validierung des im Rahmen seiner Dissertation entstandenen Markierungslichts einen Feldtest durch [59]. Der Feldtest hatte das Ziel, die Detektionsdistanz von LED Markierungslicht mit Xenon Abblendlicht zu vergleichen. Als Detektionsobjekte wurden zwei reale Personen eingesetzt, die als Fußgänger (Reflexionsgrad 7,5%) an neun möglichen Positionen auf der BMW-eigenen Teststrecke auftreten konnten. Die Wahl der Geschwindigkeit wurde den insgesamt zwölf Probanden selbst überlassen. Die Probanden hatten die Aufgabe, einen Knopf zu drücken oder sich über Sprache bemerkbar zu machen, sobald sie einen Fußgänger erkannt hatten. Für alle Objektpositionen ergab sich eine gemittelte Detektionsdistanz von 29 m bei Abblendlicht und 63 m bei Markierungslicht. Des Weiteren beschreibt SCHNEIDER, dass mit Markierungslicht auf gerader Strecke eine mittlere Detektionsdistanz von 70 – 110 m ermöglicht.

Der Überblick zum Stand der Forschung zeigt, dass schon wichtige Erkenntnisse zum Thema Blendung und Detektionsdistanz von Scheinwerfern erarbeitet wurden. Er zeigt aber auch, dass speziell hinsichtlich adaptiver Scheinwerfersystemen die Untersuchungen eher zur Validierung von Prototypen durchgeführt wurden, wobei sich diese Untersuchungen entweder mit Blendung oder mit der Feststellung einer Detektionsdistanz beschäftigen. Es zeigt sich demnach, dass eine einheitliche Untersuchung fehlt, die unter möglichst realen Bedingungen einen Serienscheinwerfer mit blendfreiem Fernlicht klar hinsichtlich physiologischer und psychologischer Blendung als auch hinsichtlich einer sich ergebenden Detektionsdistanz charakterisiert. Aus diesem Grund wurde der in diesem Kapitel vorgestellte Feldtest entwickelt und durchgeführt.

4.3 Methodik

Der im Folgenden beschriebene Feldtest wurde durchgeführt, um ein blendfreies Fernlicht hinsichtlich der Detektionsdistanz des Fahrers und einer möglichen Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu quantifizieren. Die Feldtests wurden nach einigen Vortests an insgesamt vier Nächten im Februar und März 2013 unter kontrollierten Bedingungen auf dem August-Euler-Flugplatz [60] in Darmstadt-Griesheim durchgeführt. Der August-Euler-Flugplatz ist der älteste Flugplatz Deutschlands. Er wird heute von verschiedenen Fachgebieten der Technischen Universität Darmstadt zur Durchführung von Erprobungen genutzt.



Abbildung 4.2: Runway des August-Euler-Flugplatzes

Für die Durchführung des Feldtest wurde der ca. 1200 m lange Runway des Flugplatzes verwendet. Dieser Abschnitt ist relativ eben und bietet gute und realistische Asphaltbedingungen. Zusätzlich sind hier keine störenden Lichtquellen vorhanden.

In dem Feldtest wurden zwei verschiedene Serienfahrzeuge eingesetzt, deren Marken- und Modellbezeichnungen hier aus rechtlichen Gründen nicht aufgeführt werden dürfen. Testfahrzeug 1 hatte Halogen (Abk.: HAL) Reflexionsscheinwerfer und Testfahrzeug 2 war mit Xenon (Abk.: HID) Projektionsscheinwerfern ausgestattet (vgl. Kapitel 2.2). Das Scheinwerfersystem in Testfahrzeug 2 verfügte über ein blendfreies Fernlicht. Es wurde ein Fahrzeug mit blendfreiem Fernlicht in der Form eines HID Projektionssystems ausgewählt, da dies die am weitesten verbreitete Form eines blendfreien Fernlichts darstellt. Diese Variante ist schon in Fahrzeugen der Kompaktklasse wie z.B. dem Volkswagen Golf erhältlich. Die Auswahl eines blendfreien Fernlichts auf LED Basis hätte die Vergleichbarkeit eingeschränkt, da sich solche Scheinwerfer im Gegensatz zu der HID Variante stark voneinander unterscheiden. Die Scheinwerfer der Testfahrzeuge wurden vor der Durchführung der Feldtests korrekt eingestellt. Insgesamt konnten so drei verschiedene Lichtfunktionen und zwei verschiedene Lampenarten (vgl. Kapitel 2.2) verglichen werden:

- HID Abblendlicht
- HID Fernlicht
- HID blendfreies Fernlicht
- HAL Abblendlicht
- HAL Fernlicht

Bei der Gestaltung des Feldtests wurde ein besonderes Augenmerk auf eine möglichst realistische Abbildung einer dynamischen Fahrsituation gelegt. Aus diesem Grund wurde der Feldtest so ausgelegt, dass die Testfahrzeuge nicht wie bei SPRUTE [20] und TOTZAUER [42] statisch (0 km/h) auf der Runway

positioniert werden und die Probanden zur Blendungsbewertung auf die Testfahrzeuge zufahren. Um dem sich ständig adaptierenden blendfreien Fernlicht gerecht zu werden, wurde das Verfahren von SPRUTE und TOTZAUER umgedreht: Die Testfahrzeuge bewegen sich auf die statisch (0 km/h) positionierten Probanden zu (vgl. Abbildung 4.3).

Zur Quantifizierung der Leistungsfähigkeit der Scheinwerfer wurden drei Parameter untersucht:

- Psychologische Blendung (vgl. Kapitel 2.1.3)
- Physiologische Blendung (vgl. Kapitel 2.1.2)
- Detektionsdistanz

Um vergleichbare Bedingungen zu gewährleisten, wurden alle drei Parameter gleichzeitig untersucht (vgl. Abbildung 4.3). Ein Proband fuhr ein Testfahrzeug mit einer aktivierten Scheinwerferfunktion und der Aufgabe, Objekte am rechten Straßenrand zu erkennen (Pos. 1 – Pos. 3). Gleichzeitig hatten weitere Probanden in entgegenkommenden stehenden Fahrzeugen die Aufgabe, die physiologische und psychologische Blendung des sich nähernden Testfahrzeuges zu bewerten. Ein solcher Vorgang bzw. Ablauf wird nachfolgend als „Durchlauf“ bezeichnet.

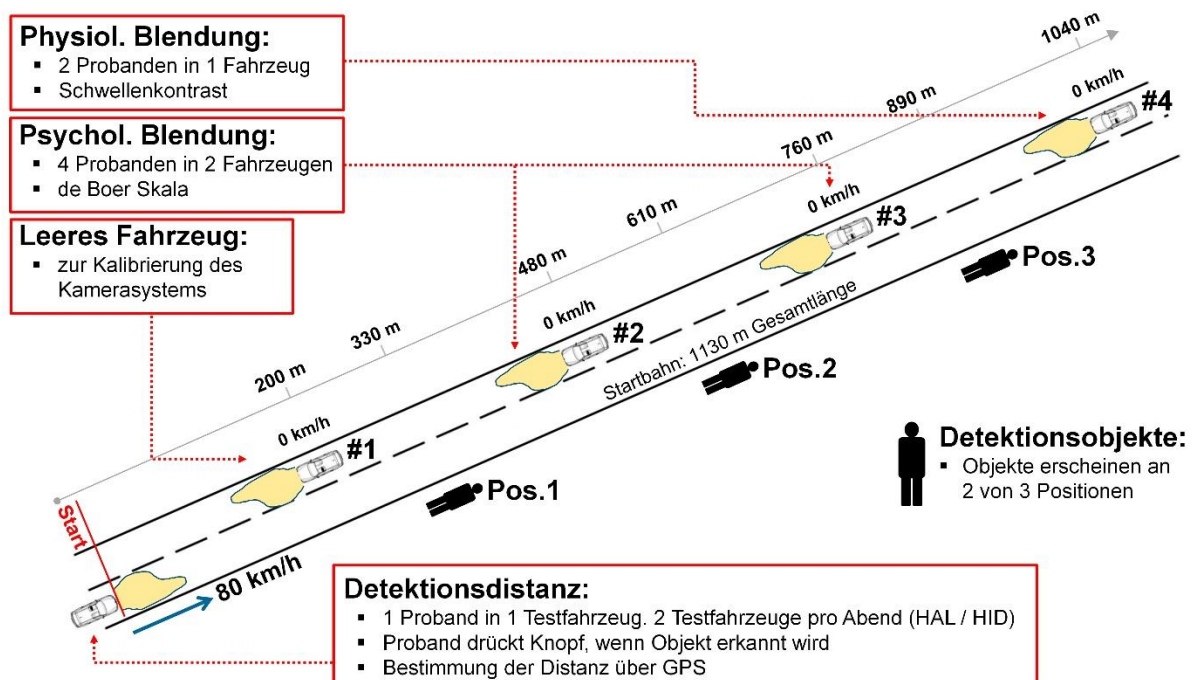


Abbildung 4.3: Testaufbau des Feldtests auf dem August-Euler-Flugplatz

Insgesamt haben fünf Fahrzeuge an jedem Durchlauf teilgenommen: Vier stehende Fahrzeuge wurden als entgegenkommender Verkehr positioniert (0 km/h), ergänzt durch eines der beiden Testfahrzeuge („Detektionsdistanz“). Während das Testfahrzeug mit 80 km/h in Richtung der statischen Fahrzeuge fuhr, war jeweils eine der fünf Scheinwerferfunktionen aktiviert. In Vortests ergab sich eine Geschwindigkeit von 80 km/h als guter Kompromiss zwischen möglichst realistischer Landstraßengeschwindigkeit und realisierbarer Endgeschwindigkeit hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Beschleunigungsstrecke. Die vier statischen Fahrzeuge waren vom gleichen Typ und wurden mit eingeschaltetem HAL Abblendlicht in einem Abstand von 280 m hintereinander positioniert (vgl. Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4). Die Fahrspurbreite betrug 3,5 m. Das erste statische Fahrzeug (#1) fungierte als Kalibrierfahrzeug. Dadurch wurde das Scheinwerfersystem des Testfahrzeuges zu Beginn jedes Durchlaufs in einen definierten

Zustand gesetzt. Die Probanden (Fahrer & Beifahrer) in den statischen Fahrzeugen #2 und #3 bewerteten die psychologische Blendung und die Probanden (Fahrer & Beifahrer) in Fahrzeug #4 die physiologische Blendung. Der Feldtest zum Thema „Einfluss der Fahrzeugbeladung auf die Blendung“ (vgl. Kapitel 5 und [61]) hat gezeigt, dass zwischen der Bewertung der psychologischen Blendung aus Fahrer- und Beifahrerposition kein signifikanter Unterschied zu erwarten ist. Aus diesem Grund wurden Probanden auf dem Fahrer- und Beifahrersitz platziert, um die Anzahl an Bewertungen zu erhöhen. Ebenso wurden in Fahrzeug #4 Probanden in der Fahrer- und Beifahrerposition platziert. Die Untersuchung wurde als Blindtest ausgelegt, sodass die Probanden in den Fahrzeugen #2, #3 und #4 nicht wussten, welches Testfahrzeug mit welcher aktivierten Scheinwerferfunktion gerade auf sie zufährt. Zusätzlich wussten die Fahrer der Testfahrzeuge nicht, an welchen Positionen (zwei von drei) die Detektionsobjekte präsentiert werden. Hierdurch wurde ein Lerneffekt der Fahrer vermieden.

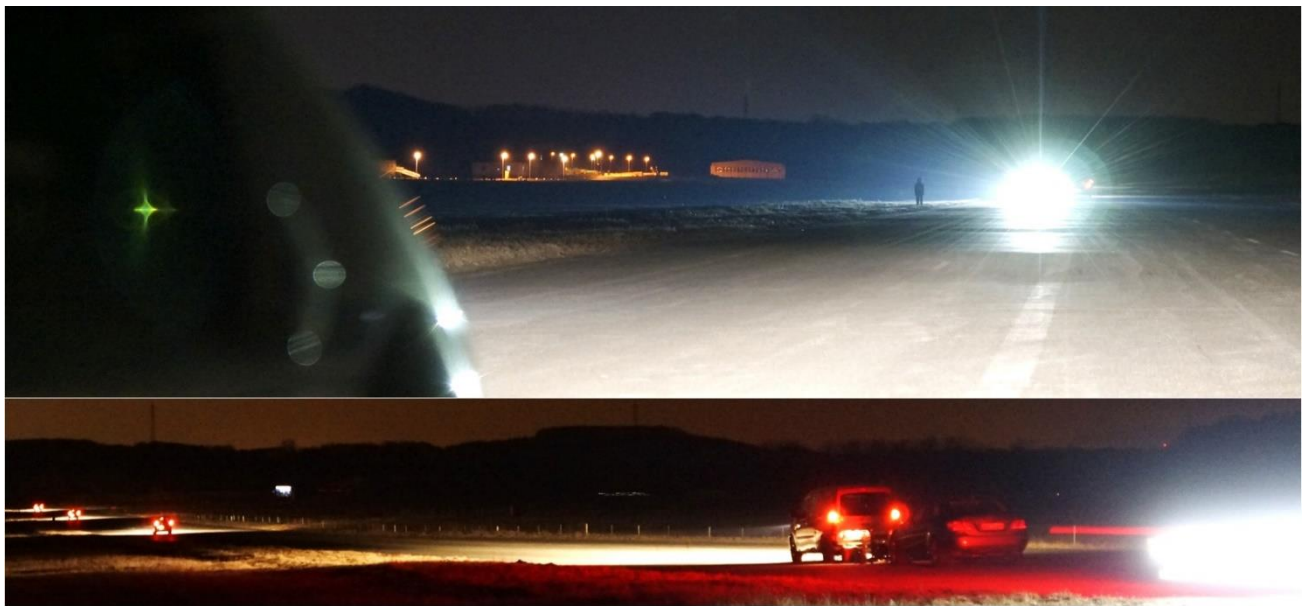


Abbildung 4.4: Blendung durch Fernlicht und Positionierung der statischen Fahrzeuge

4.3.1 Physiologische Blendung

Die Quantifizierung der physiologischen Blendung wurde in Fahrzeug #4 durchgeführt. In jedem Durchlauf führten zwei Probanden ein Schwellenkontrastexperiment in Fahrer- und Beifahrerposition durch. Der Schwellenkontrast $K_{W_{th}}$ ist der kleinste wahrnehmbare Kontrast. In Gegenwart einer Blendquelle erhöht sich der Schwellenkontrast, was ihn zu einer Messgröße für die physiologische Blendung macht. Weitere Erläuterungen zum Thema physiologische Blendung können in Kapitel 2.1.2 gefunden werden.

Die Probanden hatten die Aufgabe, den Schwellenkontrast in jedem Durchlauf kontinuierlich einzustellen. Um diese Aufgabe zu realisieren, wurden zwei Schwellenkontrast-Boxen entwickelt (vgl. Abbildung 4.5). Die Schwellenkontrast-Boxen wurden mit einer bildgebenden Leuchtdichtekamera vom Typ TechnoTeam LMK 98-3 vermessen und kalibriert.



Abbildung 4.5: Aufbau zur Bestimmung der physiologischen Blendung

Jede Schwellenkontrast-Box beinhaltete eine mittig angeordnete weiße Streuscheibe (Detektionsobjekt), hinterleuchtet mit einer dimmbaren LED. Der die LED umgebende Hintergrund der Box war schwarz gehalten. Die hinterleuchtete Scheibe wurde durch die Probanden in ihrer Helligkeit ($L_{v,o}$) zum umgebenden Hintergrund ($L_{v,u}$) kontinuierlich auf ein gerade sichtbares Niveau (Schwellenkontrast) eingestellt. Da eine schnelle Reaktion der Probanden nötig war, wurde die Helligkeit des Detektionsobjektes alle 200 ms automatisch um 1,5 % gesteigert. Sobald nun das Detektionsobjekt von seinem Hintergrund unterschieden werden konnte, hatten die Probanden die Aufgabe, einen Knopf am Eingabegerät zu drücken. Dies hatte zur Folge, dass sich die Helligkeit des Detektionsobjektes um 6 % reduzierte. Die beschriebene Kontrastanpassung verlief kontinuierlich während jedes Durchlaufs, bis das Testfahrzeug die Probanden passiert hat (vgl. Abbildung 4.6).

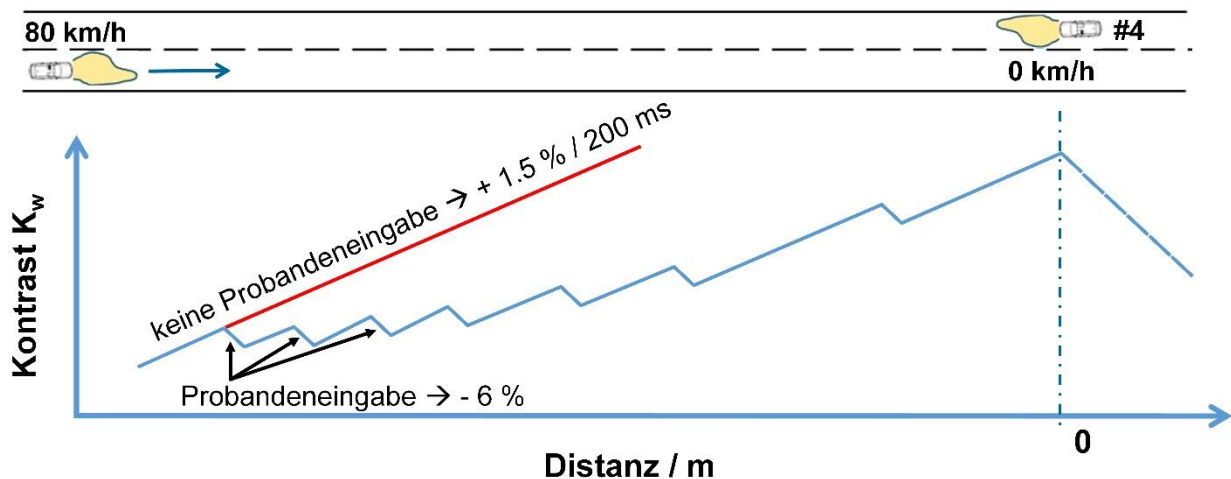


Abbildung 4.6: Aufnahme des dynamischen Schwellenkontrastes während eines Durchlaufs

Die Schwellenkontrast-Boxen wurden so vor dem Fahrer bzw. Beifahrer in Fahrzeug #4 positioniert, dass das jeweilige Detektionsobjekt (hinterleuchtete Streuscheibe) mit einem horizontalen Winkel von $2,5^\circ$ von der jeweiligen Sehachse nach rechts versetzt erscheint. Dies entspricht einem Objekt, welches sich in 80 m Abstand am rechten Fahrbahnrand befindet. Der Durchmesser der hinterleuchteten Scheibe betrug $0,5^\circ$.

Um die gewonnenen Schwellenkontrastdaten in Relation zu den Fahrzeugabständen setzen zu können (vgl. Abbildung 4.6), wurde der Abstand zwischen Fahrzeug #4 und dem entgegenkommenden Testfahrzeug anhand eines GPS-Systems ermittelt. Das GPS-System bestand aus zwei GPS-Empfängern vom Typ AEK-4T der Firma u-blox. Der erste Empfänger wurde in Fahrzeug #4 verbaut und der zweite Empfänger in das jeweilige Testfahrzeug. Der Abstand zwischen Fahrzeug #4 und der Startlinie des Testfahrzeuges war bekannt und wurde mit einem Messrad ermittelt. Bei jedem Durchlauf wurde kontinuierlich mit einer Updaterate von 5 Hz der zurückgelegte Weg des Testfahrzeuges inkl. GPS-Zeitstempel abgespeichert. Der zurückgelegte Weg wurde über Integration der GPS-Geschwindigkeit über die gefahrene Zeit bestimmt. SPRUTE zeigte mit einem ähnlichen System, dass es hierbei zu einer relativ geringen mittleren Ungenauigkeit der Wegstreckenbestimmung von 0,47 % kommt (vgl. [20]). Durch Subtraktion des zurückgelegten Weges von der Distanz zwischen Startlinie und Fahrzeug #4 wurde anschließend automatisch eine Abstandstabelle inkl. GPS-Zeitstempeln berechnet. In Fahrzeug #4 wurden die Schwellenkontraste ebenso in eine Tabelle inkl. GPS-Zeitstempel gespeichert. Durch Vergleich der GPS-Zeitstempel konnten im Anschluss die Schwellenkontrastdaten mit den Abständen in Verbindung gesetzt werden. Dasselbe GPS-System wurde auch zur Bestimmung der Detektionsdistanz verwendet.

Fahrzeug #4 war zusätzlich mit einem Photometer vom Typ HCT-99 der Firma Gigahertz-Optik ausgestattet. Das Photometer besaß eine Integrationszeit von 1 sec und wurde im Bereich der Fahreraugen vor der Windschutzscheibe mittels eines Saugnapfes befestigt.

4.3.2 Psychologische Blendung

In jedem Durchlauf führten insgesamt vier Probanden (vgl. Abbildung 4.3, Fahrzeuge #2/#3) eine psychologische Blendungsbewertung durch. Die Probanden wurden angewiesen, nur eine Bewertung für jeden vollständigen Durchlauf abzugeben. Zusätzlich wurden die Probanden angewiesen, so zu schauen, als ob sie das Fahrzeug, in dem sie sitzen, fahren (Blick in Richtung Fahrzeug davor). Die Bewertung fand auf Basis der de Boer Skala [25] statt (vgl. Abbildung 4.7). Die de Boer Skala ist eine neun Punkte Skala, auf der fünf Skalenpunkte verbal beschrieben sind. Sie reicht von „merklicher“ bis „unerträglich“ Blendung. Die de Boer Skala ist das am weitesten verbreitete Instrument zur Quantifizierung einer Blendungsempfindung im Straßenverkehr. Zu weiteren Erläuterungen zum Thema psychologische Blendung wird auf das Kapitel 2.1.3 verwiesen.

Discomfort Glare Rating – (Please perform rating from top to bottom)

	Unnoticeable		Satisfactory		Just Admissible		Disturbing		Unbearable	
1	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
2	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
3	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
4	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	

Abbildung 4.7: Fragebogen zur Bewertung der psychologischen Blendung der Testfahrzeuge

4.3.3 Detektionsdistanz

In jedem Durchlauf führte der Fahrer des Testfahrzeuges den Test zur Bestimmung der Detektionsdistanz durch. Die Aufgabe des Fahrers bestand darin, mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h in Richtung der statischen Fahrzeuge #1 - #4 zu fahren und Pappfiguren mit einer menschlichen Silhouette („Detektionsobjekte“) und einer Größe von 144 cm am rechten Fahrbahnrand zu erkennen. Der Fahrer

wurde instruiert, einen Knopf zu drücken, sobald er ein Objekt erkannt hatte. Dadurch wurde die aktuelle GPS Position mit einem Zeitstempel gespeichert (Detektionspunkt). Die Detektionsdistanz ist definiert als der Abstand zwischen dem Detektionspunkt und dem Objekt selbst. Die Detektionsdistanz wurde über die Subtraktion der gefahrenen Strecke von dem bekannten Abstand zwischen der Startlinie und dem jeweiligen Detektionsobjekt bestimmt. Die Detektionsobjekte waren grau gestrichen und wiesen einen, durch ein bildgebendes Leuchtdichtemessgerät vom Typ TechnoTeam LMK 98-3 überprüften, homogenen Reflexionsgrad von 9,7 % auf. Die folgende Abbildung 4.8 zeigt eine Leuchtdichteaufnahme aller drei Detektionsobjekte unter gleichen Beleuchtungsbedingungen. Hierbei ist zu sehen, dass sich bei allen drei Detektionsobjekten eine vergleichbare Objektleuchtdichte L_O und Umfeldleuchtdichte L_U ergeben hat. Somit wurde sichergestellt, dass alle drei Objekte durch die Fahrer gleich gut erkannt werden konnten.

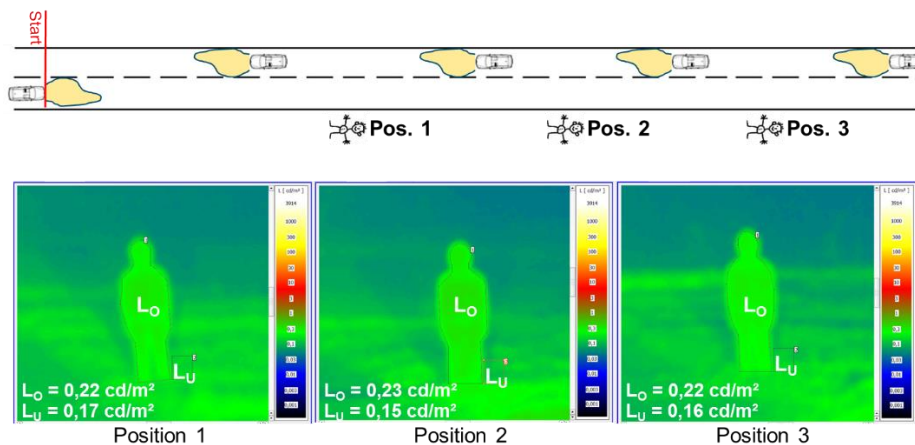


Abbildung 4.8: Leuchtdichteaufnahmen der Detektionsobjekte

4.3.4 Probanden und Bewertungen

Das durchschnittliche Alter aller Probanden betrug 30,8 Jahre mit einer Spannweite von 21 bis 41 Jahren. Die folgende Tabelle (vgl. Tabelle 4.2) zeigt die Anzahl der unterschiedlichen Probanden und die Anzahl an Bewertungen für alle getesteten Parameter und Scheinwerfertypen.

Tabelle 4.2: Probanden und Bewertungen

Parameter	Lampentyp	Lichtfunktion	Probanden	Bewertung
Psychologische Blendung	HID	Abblendlicht	16	102
		Fernlicht	16	102
		Blendfreies Fernlicht	16	102
	HAL	Abblendlicht	10	77
		Fernlicht	10	85
Physiologische Blendung	HID	Abblendlicht	14	48
		Fernlicht	14	48
		Blendfreies Fernlicht	14	46
	HAL	Abblendlicht	9	34
		Fernlicht	9	38
Detektionsdistanz	HID	Abblendlicht	7	42
		Fernlicht	7	42
		Blendfreies Fernlicht	7	44
	HAL	Abblendlicht	5	32
		Fernlicht	5	38

In der folgenden Tabelle sind ist die Anzahl der durchgeführten Fahrten aufgelistet, die für die Aufnahme der oben aufgeführten Bewertungen nötig waren.

Tabelle 4.3: Anzahl der durchgeführten Fahrten

Fahrzeug	Lichtfunktion	Durchläufe
HAL Testfahrzeug	Abblendlicht	17
	Fernlicht	19
HID Testfahrzeug	Abblendlicht	24
	Blendfreies Fernlicht	24
	Fernlicht	24

4.4 Ergebnisse

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Ergebnisse und beinhaltet ein Unterkapitel, welches eine Signifikanzanalyse der Ergebnisse auf Basis eines gepaarten T-Tests beschreibt. Da statisches Fernlicht bei Gegenverkehr nicht aktiviert sein sollte, dienen die dargestellten Ergebnisse für Fernlicht nur als Vergleichsgröße.

4.4.1 Psychologische Blendung

Abbildung 4.9 zeigt die Mittelwerte aller de Boer Bewertungen, sortiert nach Scheinwerferfunktion. Die Fehlerbalken zeigen die einfache Standardabweichung. Eine höherer de Boer Bewertung bedeutet eine niedrigere Bewertung der psychologischen Blendung.

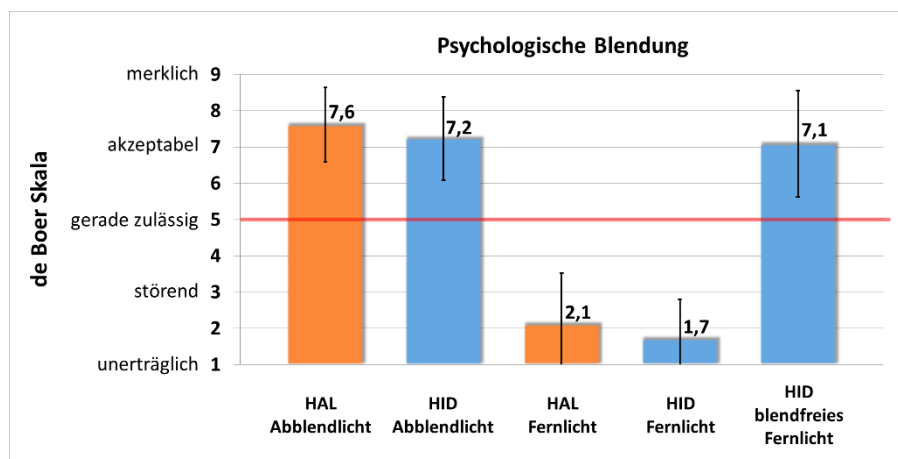


Abbildung 4.9: Psychologische Blendung: Mittelwerte

Es ist ersichtlich, dass sich HAL Abblendlicht, HID Abblendlicht und HID blendfreies Fernlicht kaum unterscheiden. In allen drei Fällen kommt es zu einer Blendung, die im Mittel in etwa als „satisfactory“ bewertet wird. Fernlicht wird generell als „disturbing“ bis „unbearable“ wahrgenommen, wobei HID Fernlicht tendenziell als etwas störender wie HAL Fernlicht empfunden wird.

4.4.2 Physiologische Blendung

Um die Einschränkung der Sehfähigkeit durch Blendung zu quantifizieren, wurden in jedem Durchlauf die dynamischen Schwellenkontrastwerte $K_{W,th}$ in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Testfahrzeug und

Fahrzeug #4 evaluiert. Der Abstand reichte hierbei von 1000 m (Startpunkt) bis 0 m. Der Kontrast wurde hierbei nach WEBER berechnet:

$$\text{Weberkontrast: } K_W = \frac{L_{v_o} - L_{v_U}}{L_{v_U}} = \frac{\Delta L_v}{L_{v_U}} \quad (4-1)$$

Abbildung 4.10 zeigt die Ergebnisse aller Durchläufe für Probanden in Fahrerposition und HAL-Scheinwerfer (dünne gepunktete Linien). Die sich ergebenden Mittelwerte wurden berechnet und sind für Abblendlicht (rot) und Fernlicht (blau) als dicke Linien dargestellt. Abbildung 4.11 zeigt die mittleren Schwellenkontrastverläufe von HAL Abblendlicht und HAL Fernlicht für die Fahrer- und Beifahrerposition, jeweils eingebettet in die einfache Standardabweichung σ .

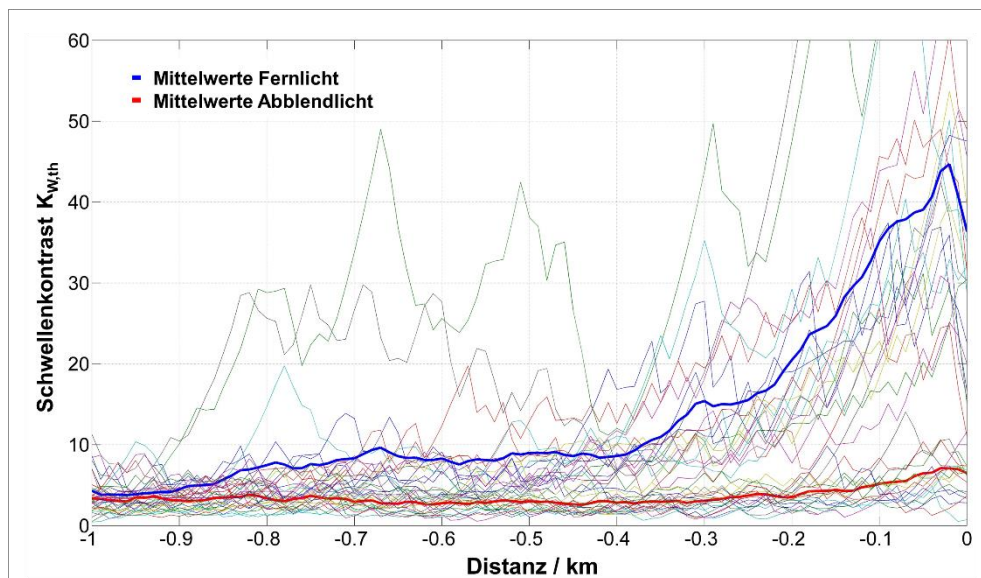


Abbildung 4.10: Schwellenkontrast HAL Fern- und Abblendlicht (Fahrerposition)

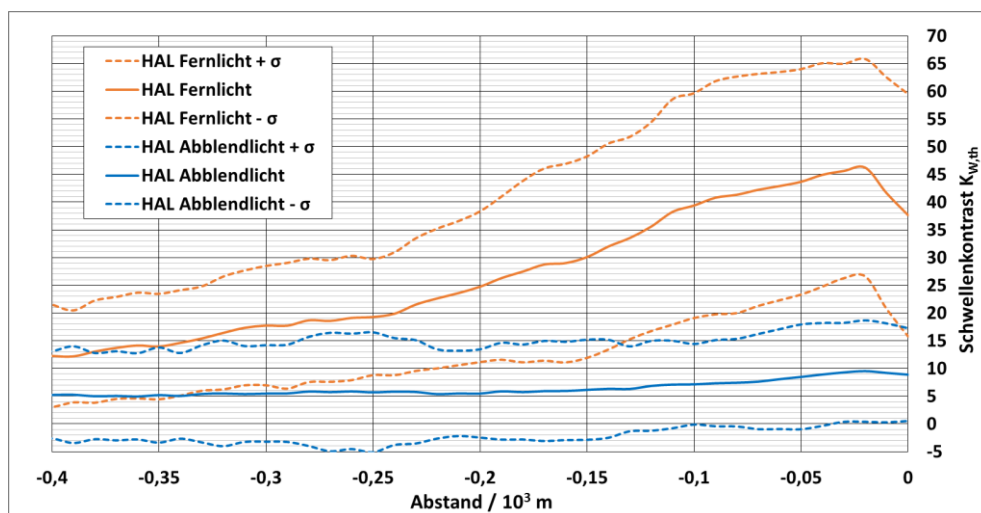


Abbildung 4.11: Schwellenkontrast HAL Fern- und Abblendlicht (Fahrer- & Beifahrerposition)

In Abbildung 4.10 ist ersichtlich, dass die individuellen Schwellenkontrastverläufe als physiologische Größen erwartungsgemäß relativ großen interpersonellen Streuungen unterliegen. Abbildung 4.11 zeigt, dass sich die Schwellenkontrastverläufe und Standardabweichungen der unterschiedlichen Scheinwerferfunktionen trotz der interpersonellen Streuungen deutlich voneinander trennen.

Nach der beschriebenen Berechnung der mittleren Kontrastwerte für alle Durchläufe (hervorgehobene Linien in Abbildung 4.10), wurden hieraus die mittleren Kontrastwerte für den Distanzbereich von 1000 m bis 0 m und 400 m bis 0 m für jede Scheinwerferfunktion berechnet. Die kürzere Distanz wurde speziell an die von SPRUTE empfohlene Abblendentfernung von 400 m [20] angepasst, da es ab dieser Distanz nach SPRUTE zu einer Blendung kommt, die über einer physiologischen Toleranzgrenze liegt.

Zum Vergleich der Ergebnisse für Fahrer und Beifahrer wurden die mittleren Kontrastwerte für das Testfahrzeug, welches die meisten Durchläufe absolviert hat, (HID Testfahrzeug, vgl. Tabelle 4.3) berechnet und in der folgenden Abbildung dargestellt. Hierbei wurden alle Scheinwerferfunktionen zusammen betrachtet. Die Fehlerbalken zeigen die einfache Standardabweichung.

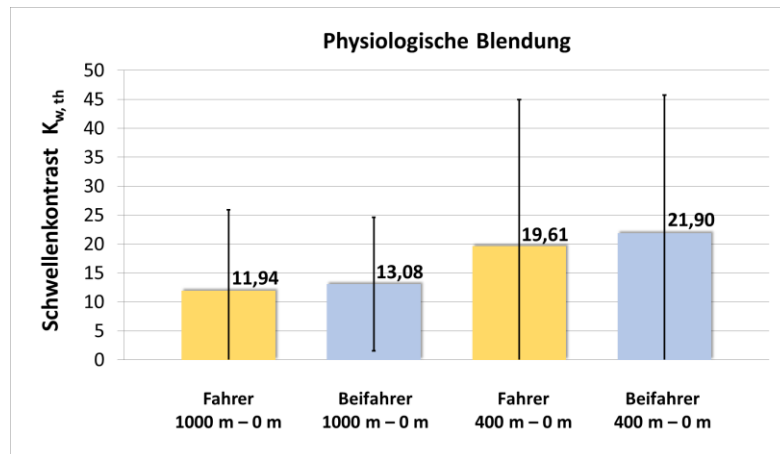


Abbildung 4.12: Physiologische Blendung von Fahrer und Beifahrer (HID Testfahrzeug)

Abbildung 4.12 zeigt, dass sich der ergebende Schwellenkontrast hinsichtlich der Fahrer- und Beifahrerposition kaum unterscheidet und demnach für die folgenden Berechnungen zusammengelegt wird. Die leicht erhöhten Werte der Beifahrer lassen sich evtl. dadurch erklären, dass Probanden, die in der Beifahrerposition Platz genommen haben, auch tendenziell weniger Fahrerfahrung besitzen und demnach ungeschulter mit einer Blendsituation umgehen. Die relativ große Standardabweichung lässt sich dadurch begründen, dass die dargestellten Schwellenkontrastwerte die Bewertungen für drei Lichtfunktionen beinhalten. Wie schon zuvor erwähnt, hat sich zusätzlich gezeigt, dass der Schwellenkontrast als physiologische Größe grundlegend einer relativ großen interpersonellen Streuung unterliegt. Die Ergebnisse für beide Testfahrzeuge und alle Lichtfunktionen werden in der folgenden Abbildung 4.13 dargestellt. Die Fehlerbalken zeigen die einfache Standardabweichung.

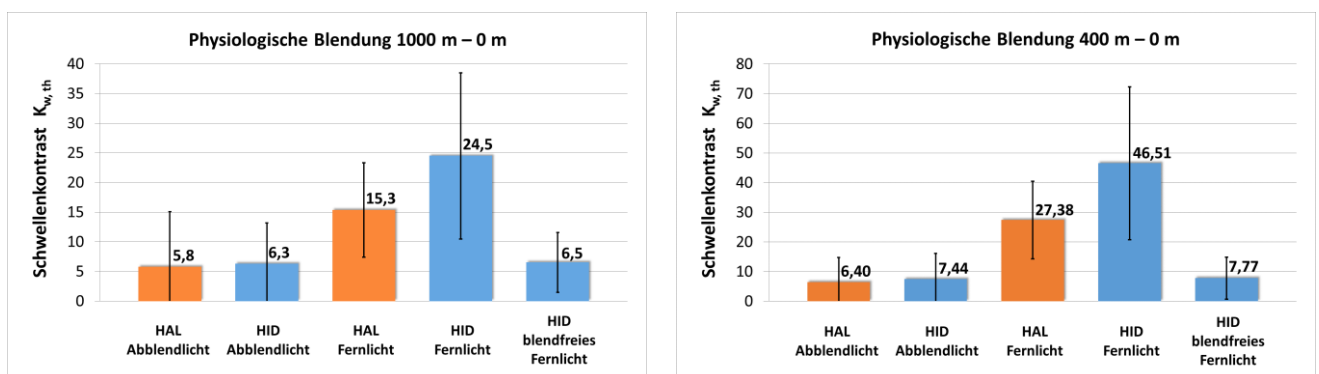


Abbildung 4.13: Mittlerer Schwellenkontrast

Es ist ersichtlich, dass sich, wie schon bei der psychologischen Blendung, HAL Abblendlicht, HID Abblendlicht und HID blendfreies Fernlicht kaum unterscheiden. In allen drei Fällen stellt sich ein vergleichbarer Schwellenkontrast ein. Im Vergleich zu Abblendlicht und blendfreiem Fernlicht ergeben sich bei Fernlicht deutlich höhere Schwellenkontraste, wobei HID Fernlicht mehr Schwellenkontrast erfordert wie HAL Fernlicht. Die beschriebenen Erkenntnisse lassen sich ebenso anhand der folgenden Abbildung 4.14 erkennen. Abbildung 4.14 zeigt die mittleren Schwellenkontrastverläufe (Fahrer und Beifahrer zusammen) in Abhängigkeit des Abstands.

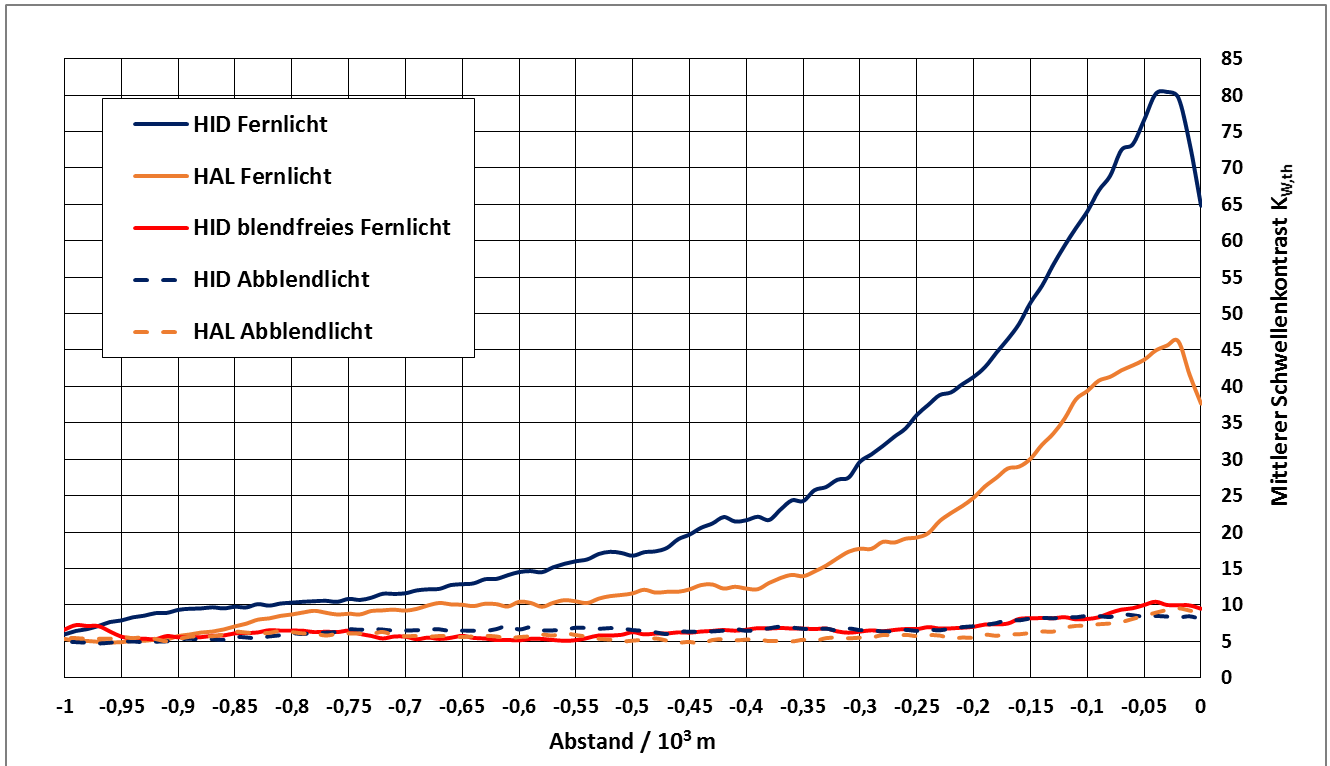


Abbildung 4.14: Mittlere Schwellenkontrastverläufe

4.4.3 Photometrische Ergebnisse

Die mittleren Beleuchtungsstärken für die Distanz 400 m bis 0 m sowie die über alle Durchläufe gemittelten Maximalbeleuchtungsstärken sind in der folgenden Abbildung 4.15 dargestellt. Die Fehlerbalken zeigen die einfache Standardabweichung.

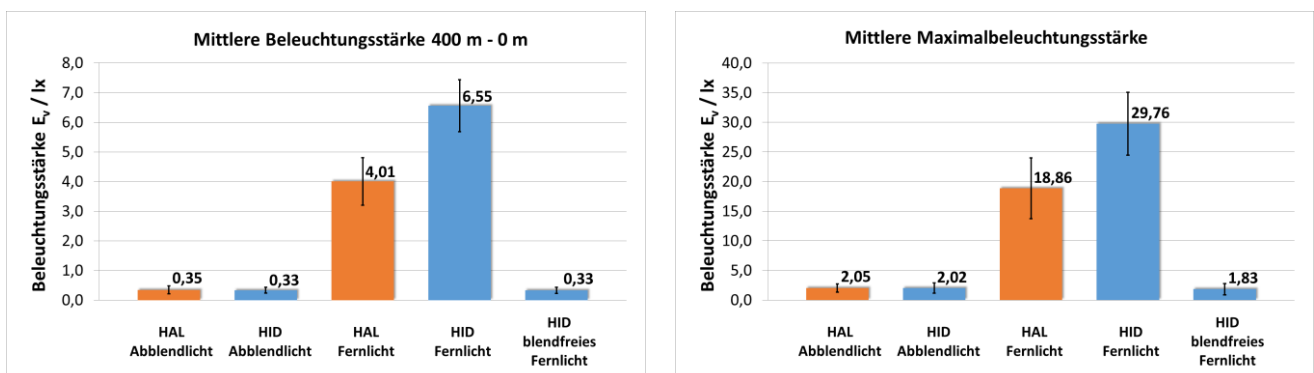


Abbildung 4.15: Mittlere Beleuchtungsstärke und mittlere Maximalbeleuchtungsstärke

Abbildung 4.15 bestätigt die Blendungsergebnisse. Es zeigt sich auch hier, dass HAL Abblendlicht, HID Abblendlicht und HID blendfreies Fernlicht sich kaum unterscheiden. Im Vergleich zu Abblendlicht und blendfreiem Fernlicht ergeben sich bei Fernlicht erwartungsgemäß wesentlich höhere photometrische Werte, wobei die Werte für HID Fernlicht deutlich über denen von HAL Fernlicht liegen.

Die folgende Abbildung 4.16 zeigt die mittlere Beleuchtungsstärke von HAL und HID Abblendlicht sowie von HID blendfreiem Fernlicht bei einer Distanz von 50 m. Es ist hierbei ersichtlich, dass sich die Beleuchtungsstärkewerte kaum unterscheiden. Zusätzlich sind in der Abbildung Vergleichswerte auf Basis des Blendpunktes B50L aus den Regularien ECE R112 [62], R98 [63] und R123 [27] angegeben. Es zeigt sich, dass die Werte aus den Regularien geringer sind als die in dem Feldtest ermittelten Werte. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die in dem Feldtest ermittelten Werte im Gegensatz zu den Werten aus den Regularien einen durch die Fahrbahnoberfläche reflektierten Anteil beinhalten.

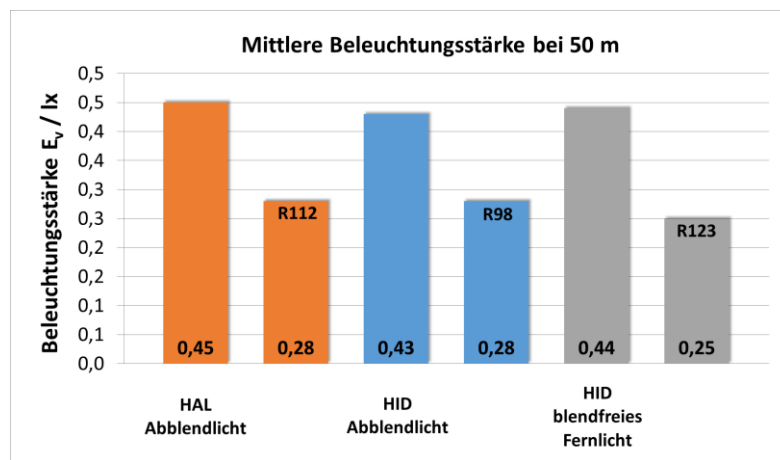


Abbildung 4.16: Mittlere Beleuchtungsstärke bei 50 m

4.4.4 Detektionsdistanz

Abbildung 4.17 zeigt die mittleren Detektionsdistanzen für jede Scheinwerferfunktion. Die Fehlerbalken zeigen die einfache Standardabweichung.

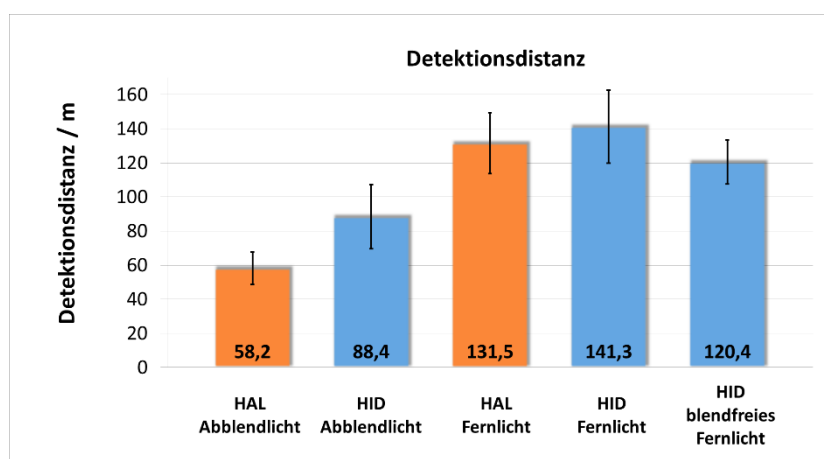


Abbildung 4.17: Mittlere Detektionsdistanz für alle Lichtfunktionen

Es ist ersichtlich, dass sich bei HID Abblendlicht eine ca. 30 m größere Detektionsdistanz als bei HAL Abblendlicht ergibt. HID blendfreies Fernlicht erreicht im Vergleich zu HAL Abblendlicht eine Steigerung

der Detektionsdistanz um ca. 62 m und im Vergleich zu HID Abblendlicht 32 m. HAL Fernlicht liegt etwa 11 m und HID Fernlicht etwa 21 m über HID blendfreiem Fernlicht.

4.4.5 Signifikanzanalyse

Die Ergebnisse in Abbildung 4.9, Abbildung 4.13 und Abbildung 4.17 zeigen Mittelwerte für die psychologische sowie für die physiologische Blendung als auch für die Detektionsdistanz. Um zu überprüfen, ob sich signifikante Unterschiede zwischen den Scheinwerferfunktionen ergeben, wurde eine statistische Analyse der Daten durchgeführt. Hinsichtlich der Blendmittelwerte wurde der Distanzbereich 1000 m bis 0 m betrachtet. Die Analyse konzentriert sich hierbei auf den Mittelwertvergleich der folgenden Scheinwerferfunktionen:

- Vergleich zwischen HAL Abblendlicht und HID Abblendlicht
- Vergleich zwischen HID Abblendlicht und HID blendfreiem Fernlicht

Der Vergleich dieser Mittelwerte wurde auf Basis eines gepaarten T-Tests durchgeführt. Ein gepaarter T-Test wurde verwendet, da die meisten Probanden für alle verglichenen Scheinwerferfunktionen Bewertungen abgegeben haben. So hat beispielsweise derselbe Proband die psychologische Blendung von HID Abblendlicht als auch von HAL Abblendlicht bewertet (verbundene Stichproben). Die Daten wurden so sortiert, dass nur Probanden in den jeweiligen Mittelwertvergleich eingegangen sind, die für beide der jeweils verglichenen Scheinwerferfunktionen eine Bewertung abgegeben haben. Die H_0 und H_1 Hypothesen wurden folgendermaßen definiert:

- H_0 : Es besteht kein Unterschied zwischen den mittleren Bewertungen
- H_1 : Es besteht ein Unterschied zwischen den mittleren Bewertungen

Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 0,05$ gesetzt. Falls der kalkulierte Wert der Irrtumswahrscheinlichkeit p niedriger als das Signifikanzniveau α ist, dann muss die Nullhypothese H_0 abgelehnt werden und es besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den mittleren Bewertungen. Die Anwendung eines Shapiro-Wilk-Tests zeigte, dass alle gepaarten Stichprobendifferenzen normalverteilt sind.

Die Signifikanzanalyse ergab die folgenden Ergebnisse:

- Vergleich zwischen HAL Abblendlicht und HID Abblendlicht
 - Psychologische Blendung: kein signifikanter Unterschied
 - Physiologische Blendung: kein signifikanter Unterschied
 - Detektionsdistanz: signifikanter Unterschied
- Vergleich zwischen HID Abblendlicht und HID blendfreiem Fernlicht
 - Psychologische Blendung: kein signifikanter Unterschied
 - Physiologische Blendung: kein signifikanter Unterschied
 - Detektionsdistanz: signifikanter Unterschied

4.5 Fazit

Der beschriebene Feldtest hatte das Ziel, die Eigenschaften eines blendfreien Fernlichtsystems hinsichtlich Blendung und Detektionsdistanz zu ermitteln. Dies wurde durch die Quantifizierung der Detektionsdistanz sowie der psychologischen und physiologischen Blendung unter möglichst realistischen Bedingungen erreicht.

Abbildung 4.9 zeigt, dass Fernlicht unabhängig von der Art der Lichtquelle (HID oder HAL) zu einer störenden bis unerträglichen psychologischen Blendung führt. Hinsichtlich der physiologischen Blendung zeigt Abbildung 4.13, dass HID Fernlicht mehr Schwellenkontrast als HAL Fernlicht erfordert. Dies kann dadurch erklärt werden, dass im Falle von HID-Scheinwerfern deutlich mehr Lichtstrom als bei HAL-Scheinwerfern zu Verfügung steht. Dies ist insbesondere relevant bei Fernlicht, da hier die Lichtverteilung auf die Maximierung der Detektionsdistanz ausgelegt ist. Gleichwohl wäre Fernlicht keine Scheinwerferfunktion, die im Falle eines Gegenverkehrsszenarios verwendet werden sollte. Da der Vergleich von Fernlicht mit unterschiedlichen Lampenarten nicht der Kern dieser Untersuchung war, wurden die Fernlichtergebnisse nicht mit einer Signifikanzanalyse verglichen.

Abbildung 4.9 und Abbildung 4.13 zeigen, dass sich für die psychologische und die physiologische Blendung keinen signifikanten Unterschied zwischen HID und HAL Abblendlicht ergibt. Betrachtet man jedoch die Detektionsdistanz, so zeigt Abbildung 4.17, dass HID Abblendlicht im Vergleich zu HAL Abblendlicht zu einer signifikanten Erhöhung der Detektionsdistanz von ca. 30 m führt.

Vergleicht man blendfreies Fernlicht mit HID Abblendlicht, so zeigt sich keine signifikante Erhöhung der psychologischen und physiologischen Blendung (vgl. Abbildung 4.9, Abbildung 4.13). Hinsichtlich der Detektionsdistanz erzielt das blendfreie Fernlicht einen signifikanten Anstieg von 32 m im Vergleich zu HID Abblendlicht und einen Anstieg von 62 m im Vergleich zu HAL Abblendlicht (vgl. Abbildung 4.17). Führt man mit 80 km/h, dann entsprechen diese Werte zusätzlichen 1,4 bzw. 2,8 Sekunden, um auf ein erkanntes Objekt reagieren zu können.

Die Ergebnisse der photometrischen Messungen bestätigen die formulierten Erkenntnisse. So zeigt sich, dass sich sowohl die Maximalbeleuchtungsstärken als auch die mittleren Beleuchtungsstärken von HAL Abblendlicht, HID Abblendlicht und blendfreiem Fernlicht kaum unterscheiden (vgl. Abbildung 4.15).

4.6 Abgeleitete Erkenntnisse

4.6.1 Ableitung einer Abblenddistanz: Vergleich mit der Arbeit von SPRUTE [20]

Da in dem beschriebenen Feldtest abstandsabhängige Schwellenkontrastwerte für Fernlicht und Abblendlicht aufgenommen wurden, ist es möglich, aus den Daten eine Abblendentfernung abzuleiten. SPRUTES Argumentation für eine Abblendentfernung ist, dass ein Fernlicht dann abgeblendet werden sollte, wenn es die maximale Blendung von Abblendlicht überschreitet (vgl. [20]). Als den Ort der maximalen Blendung definierte er einen Abstand von 50 m (vgl. Abbildung 4.1 und Kapitel 4.2).

Im Weiteren wird aus den Daten für HAL und HID Abblendlicht und Fernlicht eine Abblenddistanz abgeleitet. Hierfür wird zunächst anhand der Schwellenkontrastwerte für Abblendlicht der sich maximal ergebende Schwellenkontrast gesucht. Danach wird der Abstand in den Fernlichtdaten gesucht, ab dem der gefundene Maximalkontrast überschritten wird. Ab diesem Abstand entsteht eine höhere physiologische Blendung als bei Abblendlicht, und es sollte demnach abgeblendet werden. Abbildung 4.18 zeigt das beschriebene Vorgehen anhand der Schwellenkontrastverläufe für Abblendlicht und Fernlicht.

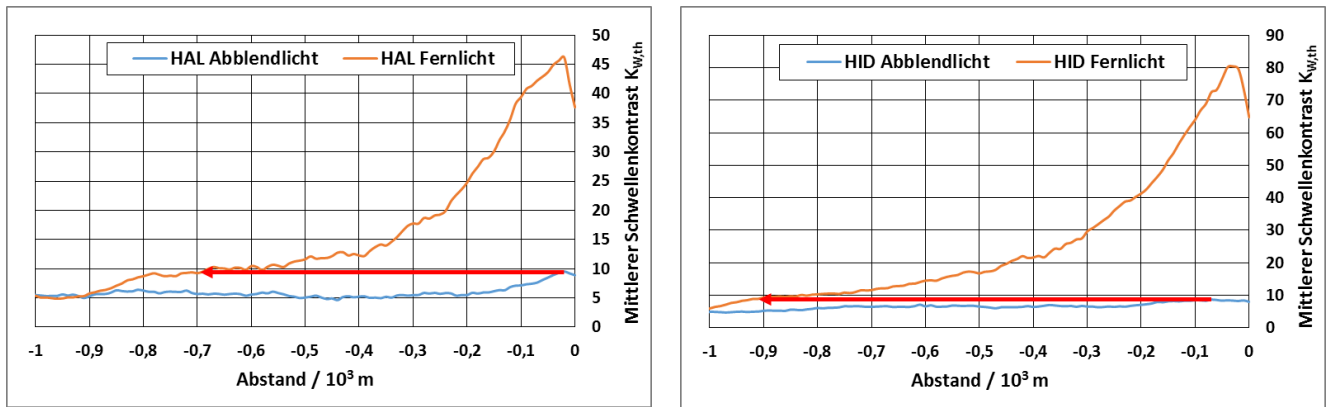


Abbildung 4.18: Abblendentfernung für HAL und HID Fernlicht

Aus den Daten ergibt sich für HAL eine Abblendentfernung von 680 m und für HID eine Entfernung von 920 m. Ab diesen Entfernungen liegt die physiologische Blendungsbelastung über der maximalen Belastung, die durch das jeweilige Abblendlicht entstehen kann. Die Abstandswerte liegen deutlich über dem Wert von 400 m, der sich bei der Untersuchung von SPRUTE ergeben hat. Dies lässt sich zum einen vermutlich dadurch begründen, dass die geblendeten Probanden sich bei SPRUTE fahrend auf das statische blendende Fahrzeug zubewegt haben, wohingegen sich bei dem hier beschriebenen Feldtest das blendende Fahrzeug auf die Probanden zubewegt hat. Zusätzlich konnte SPRUTE durch eine Fahrt nur einen Schwellenkontrast ermitteln und musste für einen kontinuierlichen, abstandsabhängigen Schwellenkontrastverlauf mehrere Fahrten mit unterschiedlichen Kontrasten der Detektionsobjekte durchführen. Pro Kontrast und Fahrt ergab sich bei ihm ein Abstand. In dem hier vorgestellten Feldtest wurde bei jeder Fahrt ein kontinuierlicher Schwellenkontrastverlauf aufgezeichnet und durch die Vielzahl der Fahrten der Schwellenkontrastverlauf statistisch präzisiert.

Im Vergleich mit der Diskussion bezüglich eines bestimmten Wertes für eine Abblendentfernung ist die hier gewonnene Erkenntnis, dass sich für unterschiedliche Scheinwerfer unterschiedliche Entfernungen ergeben, vermutlich relevanter. Auf der Basis von SPRUTES Untersuchung und auf der Basis einer Untersuchung aus dem Jahr 1975 von HELMERS und RUMAR [64] wurde in der GTB und GRE eine einheitliche Entfernung von 400 m diskutiert (vgl. [65]) und folgendermaßen als Gesetzesänderung in die Regelung ECE R48 (vgl. [66]) eingebracht.

„6.1.9.3. Automatic activation and deactivation of the main-beam headlamps:

...

6.1.9.3.1.2. The sensor system shall be able to detect on a straight level road:

(a) An oncoming power driven vehicle at a distance extending to at least 400 m“

Der Abstand wurde demnach unabhängig von der Art des Scheinwerfers auf 400 m festgesetzt. Für diesen Abstand ergibt sich aus den Ergebnissen dieses Feldtests eine Schwellenkontrasterhöhung für HAL Fernlicht von ca. 25% und für HID Fernlicht von ca. 100%, jeweils gegenüber dem Maximalwert des jeweiligen Abblendlichts. Es stellt sich demnach die Frage in wie weit es sinnvoll ist, einen festen Wert für eine Abblendentfernung festzuschreiben, da diese offensichtlich von der Leistung des Fernlichts abhängt. Ein leistungsfähiges Fernlicht, also ein Fernlicht welches relative große Detektionsdistanzen realisiert und demnach dem Gegenverkehr mit höheren photometrischen Werten begegnet, müsste gegenüber einem schwächeren Fernlicht früher abblenden. Diese Überlegung wird umso relevanter, wenn man die aktuell beginnende Markteinführung von Laserscheinwerfern beobachtet. Hierbei wird BMW voraussichtlich mit seinem Modell i8 im Herbst 2014 das erste Serienfahrzeug auf den Markt bringen, welches über einen

Laser-Scheinwerfer [67] bzw. einen Voll-LED-Scheinwerfer mit einer „Laser-Boost“ Technologie verfügt. Hierdurch soll der Scheinwerfer eine „Fernlichtreichweite“ von 600 m erreichen (vgl. [30]). Ob eine Abblenddistanz von 400 m für einen solchen Scheinwerfer reicht, scheint fraglich. Die Bestrebung der Steigerung der Detektionsdistanz durch neue Scheinwerfertechnologien ist äußerst relevant für die Verkehrssicherheit und soll hier nicht in Frage gestellt werden. Zumindest ebenso wichtig ist aber, dass die Entblendung des Gegenverkehrs zu jeder Zeit sichergestellt sein muss. Auf Basis der beschriebenen Zusammenhänge und Erkenntnisse scheint es sinnvoller zu sein, hinsichtlich einer Abblendentfernung auf photometrische Grenzwerte zurückzugreifen und demnach die Abblendentfernung individuell dem Scheinwerfer anzupassen. Ist ein Fernlicht besonders leistungsfähig, so muss der Gegenverkehr durch das Scheinwerfersystem früher erkannt werden, um zu garantieren, dass durch die eigene Sichtverbesserung die Sicht des Gegenverkehrs durch physiologische Blendung nicht reduziert wird.

4.6.2 Vergleich mit der Arbeit von HOLLADAY [19] zur physiologischen Blendung

HOLLADAY hat 1926 eine Grundsatzarbeit mit dem Titel „The Fundamentals of Glare and Visibility“ veröffentlicht. Die Kernaussage der Arbeit formuliert HOLLADAY hierbei in seiner Zusammenfassung folgendermaßen (vgl. [19]):

„The results of the investigation show that the least perceptible brightness-difference between an object and its background increases directly with the illumination at the eye from the dazzle-source; varies approximately inversely with the square of the angle which the glare-source makes with the line of vision; and is practically independent of the brightness, size, type, distance, etc. of the dazzle-source.“

In dem beschriebenen Feldtest wurden abstandsabhängige Daten zum Schwellenkontrast und demnach auch zur Schwellenleuchtdichtedifferenz gesammelt. Ebenso wurden abstandsabhängige Daten hinsichtlich der Blendbeleuchtungsstärke ermittelt. Zusätzlich lässt sich aus dem jeweiligen Abstand und der Fahrspurbreite der Blendwinkel berechnen. Die im Feldtest gewonnenen Daten zur physiologischen Blendung erlauben demnach, einen Vergleich zu dem von HOLLADAY beschriebenen Verhalten der Schwellenleuchtdichtedifferenz $\Delta L_{v,S}$ (hier engl. „least perceptible brightness difference“) anzustellen. Die Schwellenleuchtdichtedifferenz beschreibt den Leuchtdichteunterschied zwischen dem Detektionsobjekt $L_{v,O}$ und seiner Umgebung $L_{v,U}$ für die Situation, in der das Detektionsobjekt gerade von seinem Hintergrund unterscheidbar ist. HOLLADAY beschreibt in seiner Arbeit den konkreten, empirisch in einem Laborversuch ermittelten Zusammenhang der Größen Schwellenleuchtdichtedifferenz $\Delta L_{v,S}$, Blendbeleuchtungsstärke $E_{v,B}$ und dem Blendwinkel θ folgendermaßen:

$$\Delta L_{v,S} = L_{v,O} - L_{v,U} = k \cdot \frac{E_{v,B}}{\theta^n} \quad \text{mit } k = 0,14 \text{ und } n = 2 \quad (4-2)$$

Für den Vergleich mit HOLLADAYs Arbeit werden die Ergebnisse des Feldtests für HID und HAL Fernlicht verwendet, da diese eine große Dynamik der Schwellenleuchtdichtedifferenzen beinhalten. Hierbei werden die Parameter k und n von HOLLADAYs Formel (4-2) verwendet, um diese mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate an die Schwellenleuchtdichtedifferenzen des Feldtests anzupassen. Die beschriebene Funktionsanpassung wird sowohl für HID und HAL Fernlicht zusammen als auch für beide Lampenarten getrennt durchgeführt.

Die folgende Abbildung 4.19 zeigt einen Vergleich zwischen den aus den jeweiligen Anpassungen berechneten Daten mit den Daten, wie sie direkt im Feldtest entstanden sind. Eine ideale Anpassung würde exakt die gleichen Daten ergeben. In der folgenden Abbildung 4.19 entspricht dies der roten Linie.

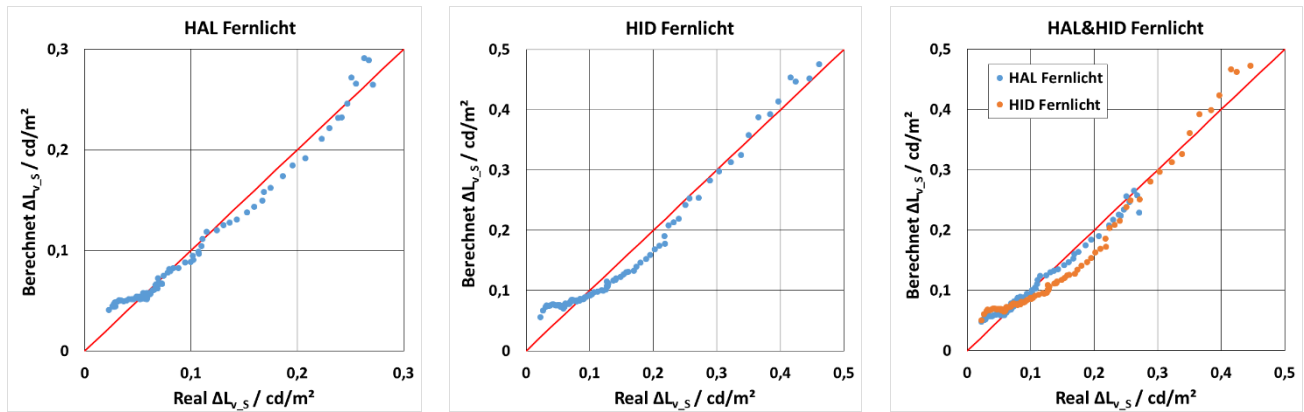


Abbildung 4.19: Vergleich der angepassten Daten mit den Feldtestdaten

Die angepassten Parameter n und k sind in Tabelle 4.4 angegeben. Zusätzlich sind hier die folgenden Maßzahlen zur Beurteilung der angepassten Funktionen dargestellt:

- Summe der Fehlerquadrate S
- Mittlere Absolutdifferenz der Schwellenleuchtdichtedifferenz zur angepassten Funktion $\Delta(\Delta L_{v_s})$
- Standardabweichung der Absolutdifferenzen $\sigma_{\Delta(\Delta L_{v_s})}$
- Bestimmtheitsmaß¹ R^2

Tabelle 4.4: Angepasste Parameter k , n und Maßzahlen zur Beurteilung der Funktionsanpassungen

	HAL Fernlicht	HID Fernlicht	HAL&HID Fernlicht
Vorfaktor k	0,072	0,076	0,075
Exponent n	0,664	0,789	0,742
S	0,011	0,048	0,073
$\Delta(\Delta L_{v_s}) / \text{cd/m}^2$	0,008	0,019	0,015
$\sigma_{\Delta(\Delta L_{v_s})} / \text{cd/m}^2$	0,007	0,011	0,011
R^2	0,977	0,959	0,958

Abbildung 4.19 zeigt, dass sich die Daten für HAL und HID Fernlicht zusammen nicht gänzlich in einer Funktionsanpassung abbilden lassen. Es ist zu sehen, dass sich hierbei die einzelnen Lampenarten teilweise getrennt in zwei Strängen abbilden. Dies ist ein Indiz dafür, dass der letzte Teil des eingangs erwähnten Zitates von HOLLADAY zumindest für Feldtestversuche in Frage gestellt werden kann: Die Schwellenleuchtdichtedifferenz scheint demnach nicht gänzlich unabhängig von der Leuchtdichte, der Größe und der Art der Blendquelle zu sein. Zumindest einer dieser Parameter scheint hier einen Einfluss zu haben und somit die sich ergebenden Werte für die Schwellenleuchtdichtedifferenz hinsichtlich HID und HAL teilweise zu trennen. Um die verursachenden Parameter genau zu identifizieren und die Funktion (4-2) entsprechend zu erweitern, könnten in weiteren Untersuchungen mittels eines Forschungsscheinwerfers, wie z.B. von MICHENFELDER et. al. vorgestellt (vgl. [68] [69] [70] [71]), einzelne Parameter definiert variiert und deren Einfluss studiert werden.

¹ Bestimmtheitsmaß R^2 : Das Bestimmtheitsmaß ist das Quadrat des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten. Es ist eine Maßzahl für den linearen Zusammenhang zweier Variablen. Es wird im Rahmen dieser Arbeit verwendet zur Abschätzung des linearen Zusammenhanges zwischen realen Feldtestwerten und den Werten, die sich durch eine Funktionsanpassung ergeben. Nimmt das Bestimmtheitsmaß einen Wert von $R^2 = 1$ an, so kann man von einem linearen Zusammenhang ausgehen. Bei einem Wert von $R^2 = 0$ liegt kein linearer Zusammenhang vor.

Getrennt betrachtet lässt sich die Funktion (4-2) gut an die Daten für HAL und HID Fernlicht anpassen. Demnach kann die Aussage von HOLLADAY bestätigt werden, dass die Schwellenleuchtdichte sich direkt mit der Blendbeleuchtungsstärke vergrößert. Hinsichtlich des Blendwinkels beschreibt HOLLADAY, dass sich die Schwellenleuchtdichte invers mit dem Quadrat des Blendwinkels verändert. Demnach beschreibt er einen Exponenten von $n=2$. Die Werte für den Exponenten des Blendwinkels ergeben sich im Feldtest hingegen für HAL zu $n=0,66$ und für HID zu $n=0,79$. Die Detektionsobjekte wurden durch die Probanden im Feldtest peripher in einem horizontalen Winkel zur Sehachse von $2,5^\circ$ nach rechts betrachtet. HOLLADAY hingegen hat seine Probanden die Detektionsobjekte direkt, foveal betrachten lassen. Um den Einfluss dieses Versatzes zu untersuchen, wurden die zuvor beschriebenen Berechnungen und Funktionsanpassungen für HID und HAL Fernlicht mit einem um $2,5^\circ$ korrigierten Blendwinkel erneut durchgeführt.

$$\text{Korrigierter Blendwinkel: } \theta_{B,k} = \theta_B + 2,5^\circ \quad (4-3)$$

Als Resultat ergibt sich ein Exponent für HAL Fernlicht von $n=1,6$ und für HID Fernlicht ein Exponent von $n=2,3$. Die Werte kommen dem Wert $n=2$ von HOLLADAY deutlich näher. Problematisch ist hierbei aber, dass sich die Summe der Fehlerquadrate gegenüber den Berechnungen für den unkorrigierten Blendwinkel für HAL Fernlicht um 152% und für HID Fernlicht um 39% erhöhen. Demnach ist die unkorrigierte Betrachtung exakter. Trotzdem lässt sich aus der korrigierten Betrachtung schließen, dass die gegenüber HOLLADAY reduzierten Exponenten sich vermutlich durch die periphere Lage der Detektionsobjekte erklären lassen. Unterschiede zu HOLLADAY's Werten für k und n ergeben sich aber auch aus verschiedenen anderen Gründen wie z.B., dass ein dynamischer Versuchsablauf im Freifeld durchgeführt wurde, die Beleuchtungsstärkewerte vor der Windschutzscheibe aufgenommen wurden oder aber auch durch die jeweils angewendete Methodik der Schwellenfindung.

In der folgenden Abbildung 4.20 ist die Abhängigkeit der Schwellenleuchtdichtedifferenz $\Delta L_{v,s}$ von dem Blendwinkel θ_B und der Blendbeleuchtungsstärke $E_{v,B}$ für HAL und HID Fernlicht anhand der angepassten Funktionen visualisiert. Wobei deutlich der lineare Anteil der Blendbeleuchtungsstärke und der $1/\theta_B^n$ Anteil des Blendwinkels erkennbar sind.

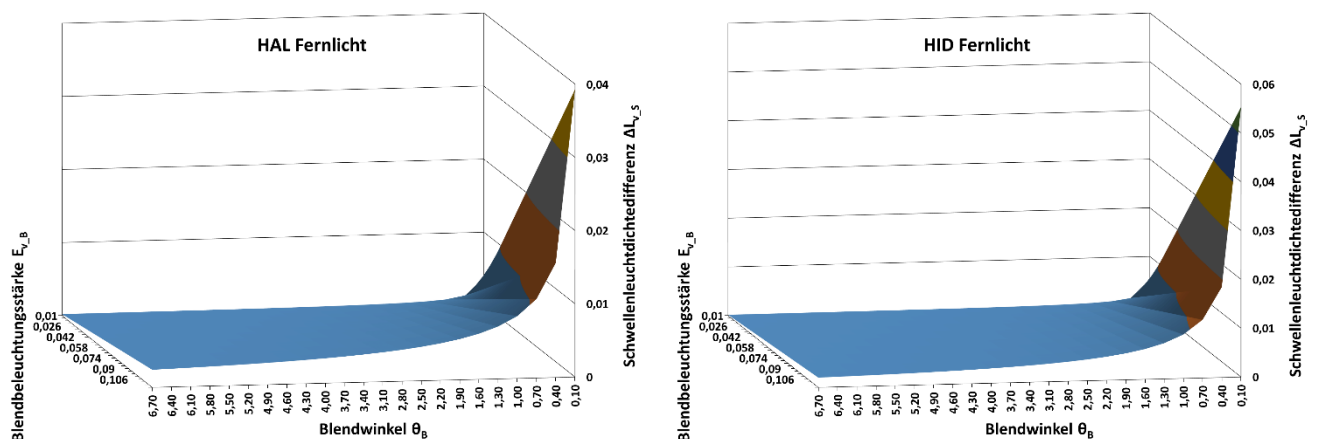


Abbildung 4.20: Abhängigkeit der Schwellenleuchtdichtedifferenz von θ_B und $E_{v,B}$

4.6.3 Vergleich von physiologischer und psychologischer Blendung

Im Rahmen des beschriebenen Feldtestes wurde unter dynamischen Bedingungen die physiologische und psychologische Blendung von HID und HAL Fernlicht und Abblendlicht sowie für HID blendfreies Fernlicht

bestimmt. Durch eine mathematische Verknüpfung der Mittelwerte der physiologischen und psychologischen Blendung für diese fünf Lampen und Lichtverteilungskombinationen wird im Folgenden versucht, eine Verbindung zwischen den beiden Blendungsarten herzustellen. Als Werte für die physiologische Blendung wurden die Mittelwerte des Schwellenkontrastes für den Abstandsbereich 0 m – 400 m verwendet.

Die de Boer Skala hat mit den de Boer Werten $W = 1$ und $W = 9$ feste Grenzen. Aus diesem Grund wird im Folgenden angenommen, dass sich die psychologische Blendungsbewertung für große und kleine Schwellenkontraste asymptotisch an diese de Boer Werte nähert. Hieraus lassen sich die folgenden Grenzbedingungen ableiten:

$$\lim_{K_{W,th} \rightarrow 0} W(K_{W,th}) = 9 \stackrel{\text{def}}{=} \text{"unnoticeable glare"} \quad (4-4)$$

$$\lim_{K_{W,th} \rightarrow \infty} W(K_{W,th}) = 1 \stackrel{\text{def}}{=} \text{"unbearable glare"} \quad (4-5)$$

Zur Umsetzung der Grenzbedingungen wird auf eine Sigmoid- oder S-Funktion zurückgegriffen. Hierbei werden die mittleren Bewertungen für die physiologische und psychologische Blendung gegeneinander aufgetragen. Anschließend wird eine S-Funktion an diesen Verlauf angepasst. Im Folgenden ist die verwendete S-Funktion dargestellt.

$$S - \text{Funktion: } W = m * \frac{K_{W,th}^n}{K_{W,th}^n + h^n} + k \quad (4-6)$$

Das Anpassen der S-Funktion an die Blendungsbewertungen des Feldtests wird mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate unter Veränderung der Parameter m, n, h und k durchgeführt. Der sich ergebende angepasste Verlauf der beiden Blendungsarten ist als rote Linie in Abbildung 4.21 dargestellt. Als blaue Punkte sind hierbei die fünf Lampen und Lichtverteilungskombinationen dargestellt. In Abbildung 4.22 ist ein Vergleich der realen Daten mit den Daten, die sich aus der angepassten Funktion ergeben, dargestellt. Es zeigt sich hierbei, dass sich mittels der angepassten S-Funktion annähernd die gleichen de Boer Werte errechnen lassen, wie sie sich im Feldtest ergeben haben. Eine ideale Funktionsanpassung ist in Abbildung 4.22 symbolisch durch die rote Linie dargestellt.

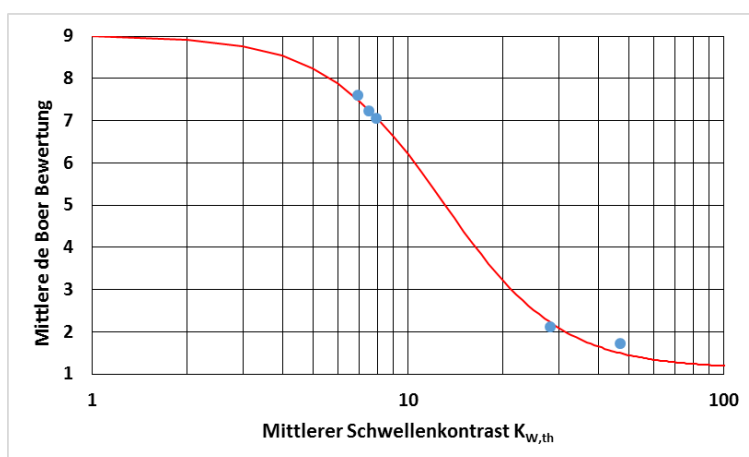


Abbildung 4.21: Psychologische zu physiologische Blendung

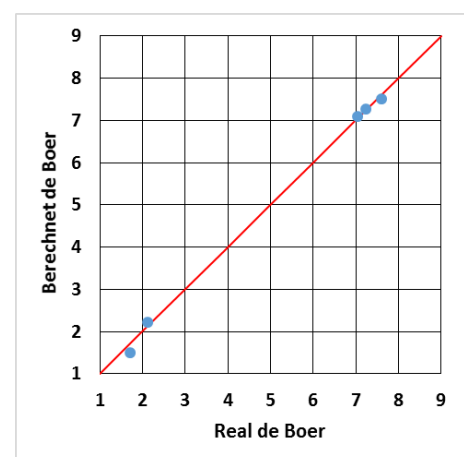


Abbildung 4.22: Vergleich: Fit zu Realdaten

In der folgenden Tabelle 4.5 sind die angepassten Parameter m, n, h und k , als auch die folgenden Maßzahlen zur Beurteilung der Funktionsanpassung angegeben.

- Summe der Fehlerquadrate S
- Mittlere Absolutdifferenz der realen de Boer Werte zur angepassten Funktion $\Delta(W)$
- Standardabweichung der Absolutdifferenzen $\sigma_{\Delta(W)}$
- Bestimmtheitsmaß R^2

Tabelle 4.5: Angepasste Parameter und Maßzahlen zur Beurteilung der Funktionsanpassung

Charakterisierung der Funktionsanpassung				Angepasste Parameter			
S	$\Delta(W)$	$\sigma_{\Delta(W)}$	R^2	m	n	h	k
0,09	0,09	0,07	1	-7,9	2,33	12,86	9,02

Abbildung 4.21 und Abbildung 4.22 als auch Tabelle 4.5 zeigen, dass sich das Verhalten der mittleren physiologischen zur mittleren psychologischen Blendung äußerst präzise mit einer S-Funktion beschreiben lässt. Diese Aussage beschränkt sich hierbei ausdrücklich auf die relativ geringe Anzahl von fünf gegebenen Stützstellen bzw. Lampen und Lichtverteilungskombinationen. Wie zuvor besprochen, basieren die hier verwendeten fünf Vergleichspunkte auf mittleren Bewertungen: Im Falle der psychologischen Blendung bewerten die Probanden eine komplette Fahrt auf Basis der de Boer Skala. Im Falle der physiologischen Blendung wird zum Vergleich der mittlere Schwellenkontrast im Abstandsbereich 0 m – 400 m verwendet. Aus diesem Grund ist die vorgestellte Verknüpfung der physiologischen und psychologischen Blendung nur schwer mit klassischen Blendungsmodellen vergleichbar, da diese eine winkelabhängige Charakterisierung der Blendung beschreiben. Der Vergleich zeigt aber, dass physiologische und psychologische Blendung unter realen Feldtestbedingungen durchaus mathematisch verknüpfbar sind. Ein Vergleich der gängigen winkelabhängigen Blendungsmodelle für die physiologische und psychologische Blendung wird in der Arbeit von TOTZAUER [42] beschrieben und kann von dem interessierten Leser dort nachgelesen werden.

5 Einfluss der Fahrzeugbeladung auf die Blendung

5.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden der Aufbau, die Durchführung und die Ergebnisse des Feldtests zur Bestimmung des Einflusses einer Fahrzeugbeladung auf die Blendung beschrieben.

Kommt es zu einer Beladung eines Fahrzeuges mit fehlender oder deaktivierter automatischer Leuchtweitenregelung, so bewegt sich die Hell-Dunkel-Grenze aufwärts und die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer wird sich tendenziell erhöhen. Bezugnehmend hierzu sollte der in diesem Kapitel beschriebene Feldtest klären, in welchem Maße sich die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer durch eine Beladung allgemein erhöht und von welchen Parametern diese ladungsbedingte Blendung abhängt. Die Ergebnisse des Feldtestes zur Bestimmung der Blendung und Detektionsdistanz von blendfreiem Fernlicht (vgl. Kapitel 4) haben gezeigt, dass sich das Abblendlicht von korrekt eingestellten Xenon- und Halogenscheinwerfern unbeladener Fahrzeuge nicht signifikant unterscheidet. Eine weitere Fragestellung dieses Feldtestes war, ob sich dieser nicht signifikante Einfluss der Art der Lichtquelle ebenso bei einer von beladenen Fahrzeugen ausgehenden Blendung ergibt. Das abschließende Ziel des Feldtests war, auf Basis der Ergebnisse eventuell mögliche Ausnahmen einer obligatorischen automatischen Leuchtweitenregelung zu identifizieren und der GTB und GRE eine Daten- und Argumentationsgrundlage für Entscheidungen zur Verfügung zu stellen. Weitere Motivationsaspekte dieses Feldtests sind in Kapitel 1.2.2 dargelegt.

Die Ergebnisse des Feldtestes wurden 2012 vor der GTB Working Group Front Lighting präsentiert und auf dem International Symposium on Automotive Lighting 2013 veröffentlicht [61].

5.2 Methodik

Der Feldtest wurde auf einer DEKRA Teststrecke in Klettwitz durchgeführt. Hierbei bewerteten insgesamt 47 Probanden die psychologische Blendung von unterschiedlichen Fahrzeugen, mit unterschiedlichen Scheinwerfern und variierenden Beladungszuständen. Zusätzlich wurden photometrische Messungen durchgeführt, welche in dem Unterkapitel 5.2.2 beschrieben werden.

5.2.1 Versuchsaufbau, Probanden und Ablauf

Das durchschnittliche Alter aller Probanden betrug 44,5 Jahre mit einer Spannweite von 26 bis 64 Jahren. Hierbei waren 28 der 47 Probanden auf eine Sehhilfe angewiesen. Das Grundkonzept des Feldtests war, dass die Probanden ihre empfundene psychologische Blendung von entgegenkommenden Fahrzeugen mit aktiviertem Abblendlicht bewerten. Die Probanden wurden hierbei in Fahrzeuge mit aktiviertem Abblendlicht gesetzt, welche entlang eines geraden Abschnitts der Teststrecke statisch (0 km/h) mit einem Abstand von 40 m hintereinander positioniert wurden (vgl. Abbildung 5.1). Hierbei besetzten die Probanden jeweils den Fahrer- und Beifahrersitz der insgesamt 24 statischen Probandenfahrzeuge. In zwei zusätzlichen statischen Fahrzeugen, welche als letztes und erstes Fahrzeug positioniert wurden, fanden die photometrischen Messungen statt.



Abbildung 5.1: Statische Probandenfahrzeuge (Quelle: T. Küppers)

Die entgegenkommenden Fahrzeuge wurden von professionellen Fahrern der DEKRA gefahren, wobei diese instruiert wurden, mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h auf die statischen Probandenfahrzeuge zuzufahren. Die Probanden wurden hierbei angewiesen, so zu schauen, als ob sie das Fahrzeug, in dem sie sitzen, fahren (Blick auf Fahrzeug davor). Nach jeder kompletten Vorbeifahrt (im folgenden Durchlauf genannt) hatten die Probanden die Aufgabe, ihre empfundene psychologische Blendung anhand der de Boer Skala auf einem Fragebogen zu dokumentieren (vgl. Abbildung 5.2).



Abbildung 5.2: Blendungsbewertung eines Probanden (Quelle: T. Küppers)

Der Fragebogen war hierbei genauso gestaltet wie im Feldtest zur Bestimmung der Blendung und Detektionsdistanz von blendfreiem Fernlicht (vgl. Kapitel 4.3.1 und Abbildung 4.7). Hierbei war dies ebenso ein Blindtest, d. h. die Probanden wussten nicht, welches Fahrzeug mit welchem Scheinwerfer und mit welcher Beladung gerade auf sie zufährt. Insgesamt wurden 61 Durchläufe mit 25 unterschiedlichen Serienfahrzeugen unternommen, deren Marken- und Modellbezeichnung hier aus rechtlichen Gründen nicht genannt werden darf. Eines dieser Fahrzeuge war ein Kalibrierfahrzeug. Es führte insgesamt sechs angekündigte Beispielfahrten und drei nicht angekündigte Durchläufe zur Stabilitätsprüfung durch. Die restlichen 24 Fahrzeuge setzten sich aus zwölf HAL Fahrzeugen (zwei mit Projektionsscheinwerfern, zehn mit Reflexionsscheinwerfern), acht HID Fahrzeugen und vier Fahrzeugen mit LED-Scheinwerfern zusammen. Der Feldtest wurde an einem Abend durchgeführt und wurde in zwei Hälften geteilt, zwischen denen sich die Probanden ausruhen konnten.

Die folgende Tabelle beschreibt die Anzahl der Durchläufe, die Anzahl unterschiedlicher Fahrzeuge und die Anzahl der Beladungszustände.

Tabelle 5.1: Beladungszustände, Fahrzeuge und Durchläufe (ohne Kalibrierfahrzeug)

Beladungszustände	Fahrzeuge	Durchläufe
0%	23	23
50%	24	25
100%	4	4

Der Beladungszustand 0% entspricht hierbei dem Leergewicht des Fahrzeuges, welches auch als Voraussetzung für die Einstellung der Scheinwerfer nach ECE R48 [9] eingehalten werden muss. Eine Beladung von 100% entspricht dem zulässigen Gesamtgewicht des jeweiligen Fahrzeuges.

Vor dem Feldtest wurden die Scheinwerfer der Fahrzeuge unter den Bedingungen der Regelung ECE R48 eingestellt [9]:

- Korrekter Luftdruck der Reifen
- Kraftstofftank nicht weniger als 90% gefüllt
- Eine Person mit 75 kg auf dem Fahrersitz

Die Scheinwerfer wurden hierbei an einer Wand in zehn Metern Entfernung auf einen Nickwinkel der Hell-Dunkel-Grenze von -1% eingestellt (vgl. Abbildung 5.6). Nach dem Einstellprozess verließen die Fahrzeuge nicht die Einstellposition, sondern es wurde jedes Fahrzeug mit den Gewichten beladen, mit denen es im Laufe des Feldtests gefahren wurde (50% und teilweise 100%). Nach entsprechender Beladung wurde die sich ergebende Position der Hell-Dunkel-Grenze an der Wand in zehn Metern Entfernung abgelesen und in einen Nickwinkel umgerechnet und notiert. Falls die Fahrzeuge mit einer automatischen Leuchtweitenregelung ausgestattet waren, so wurde diese vor dem Feldtest inkl. Einstellprozess deaktiviert.

5.2.2 Photometrische Messungen

Wie schon zuvor erwähnt wurden die photometrischen Messungen in dem ersten und letzten Fahrzeug der statischen Fahrzeugreihe durchgeführt. Hierbei wurde im ersten Fahrzeug die Blendbeleuchtungsstärke am Fahrer- und Beifahrerauge konstant in Abhängigkeit der Zeit gemessen. Die Messrate war hierbei 1 Hz. Im letzten Fahrzeug wurde die Leuchtdichte aus Fahrerperspektive mit einer bildgebenden Leuchtdichtekamera vom Typ TechnoTeam LMK 98-3 gemessen. Die Leuchtdichtemessungen wurden für jedes Fahrzeug bzw. jeden Durchlauf in den Abständen 25 m und 50 m durchgeführt. Hierfür mussten die Fahrer nach Vorbeifahrt an dem letzten statischen Probandenfahrzeug abbremsen und an zwei Markierungen (50 m, 25 m) halten, um eine Messung zu ermöglichen. Die folgende Abbildung zeigt das photometrische Messequipment (vgl. Abbildung 5.3).



Abbildung 5.3: Photometrisches Messequipment (Quelle: T. Küppers)

5.3 Ergebnisse

Der Feldtest generierte einen Datensatz von ca. 2800 de Boer Bewertungen. Die im Folgenden aufgeführten Ergebnisse wurden statistisch analysiert. Hierbei wurde wie auch im Feldtest zur Bestimmung der Blendung und Detektionsdistanz von blendfreiem Fernlicht auf einen T-Test für verbundene Stichproben zurückgegriffen (vgl. Kapitel 4.4.5). Die Normalverteilung der Stichprobendifferenzen, aller mittels Signifikanzanalyse verglichenen Mittelwerte, wurde mit einem Shapiro-Wilk-Test positiv getestet. Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 0,05$ gesetzt. Falls der kalkulierte Wert der Irrtumswahrscheinlichkeit p niedriger als das Signifikanzniveau α ist, dann muss die Nullhypothese H_0 abgelehnt werden und es besteht

ein signifikanter Unterschied zwischen den mittleren Bewertungen. Die H_0 und H_1 Hypothesen wurden demnach folgendermaßen definiert:

- H_0 : Es besteht kein Unterschied zwischen den mittleren Bewertungen
- H_1 : Es besteht ein Unterschied zwischen den mittleren Bewertungen

Falls im Folgenden von signifikant oder nicht signifikant gesprochen wird, bezieht sich dies auf den beschriebenen Test. Wenn in den folgenden Grafiken Fehlerbalken angegeben sind, so zeigen diese die einfache Standardabweichung.

5.3.1 Vergleich der Bewertungen von Fahrer und Beifahrer

Die Bewertungen der psychologischen Blendung der Probanden auf der Fahrer- und Beifahrersitzposition wurden zusammengelegt, da sich kein signifikanter Unterschied der Bewertungen ergeben hat. In folgender Abbildung 5.4 sind die mittleren Bewertungen der 61 Durchläufe von Fahrer und Beifahrer gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass die Bewertungen äußerst dicht zusammen liegen.

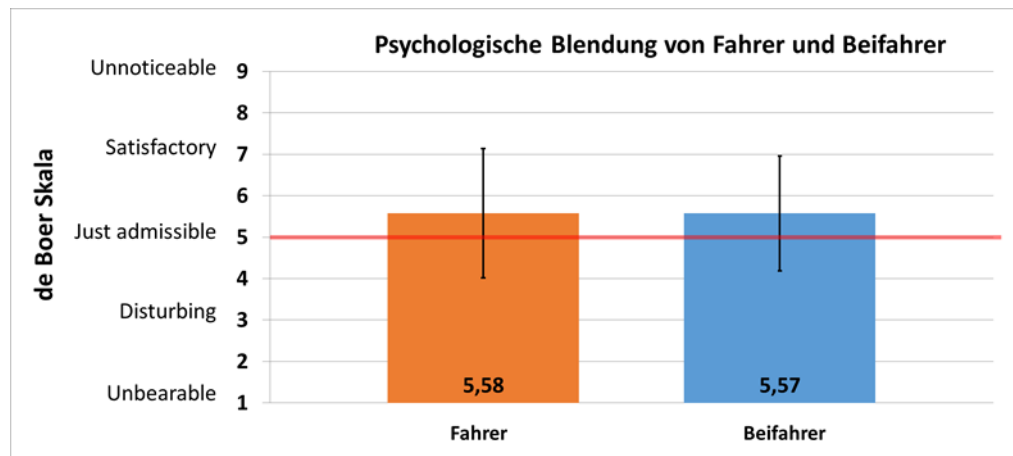


Abbildung 5.4: Mittlere psychologische Blendung von Fahrer und Beifahrer

5.3.2 Stabilität der de Boer Bewertungen

Für die Untersuchung der Stabilität ist das Kalibrierfahrzeug insgesamt dreimal den Probanden während der Durchführung des Feldtests entgegengefahren. Zusätzlich ist ein Fahrzeug zweimal mit der Beladung 50% gefahren. Dieser Umstand wird ebenso genutzt zur Überprüfung der Stabilität der Bewertungen. In der folgenden Tabelle 5.2 ist die mittlere de Boer Bewertung sowie die einfache Standardabweichung der beiden Fahrzeuge dargestellt.

Tabelle 5.2: Stabilität der de Boer Bewertungen

	Kalibrierfahrzeug			50% Fahrzeug	
	Fahrt 1	Fahrt 2	Fahrt 3	Fahrt 1	Fahrt 2
Gefahren in Halbzeit	1	2	2	1	2
Mittelwert / de Boer	4,79	4,77	4,57	5,94	6,06
Standardabweichung	1,43	1,25	1,56	1,24	1,41

Die Mittelwerte zeigen, dass die Bewertungen der Probanden äußerst stabil über die gesamte Laufzeit des Testes waren. Das gilt für das Kalibrierfahrzeug und für das Fahrzeug, welches zweimal mit einer Beladung von 50% gefahren ist. Ebenso sind die Standardabweichungen stabil, was auch ein Indiz für einen stabilen Feldtest ist.

5.3.3 Abhängigkeit der de Boer Bewertungen von der Beladung

Die folgende Abbildung 5.5 zeigt die mittleren de Boer Bewertungen in Abhängigkeit von den Beladungszuständen 0%, 50% und 100%. Die de Boer Mittelwerte für 0% und 50 % als auch die Mittelwerte für 50% und 100% unterscheiden sich signifikant.

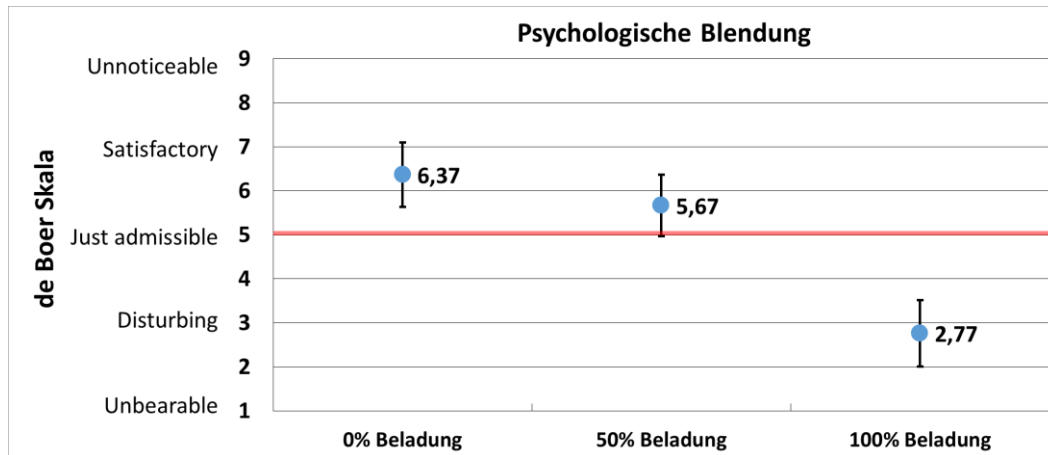


Abbildung 5.5: Mittlere psychologische Blendung in Abhängigkeit von der Beladung

Abbildung 5.5 zeigt, dass die Beladung der Fahrzeuge einen signifikanten Einfluss auf die Blendungsbewertung der Probanden hat. Der Mittelwert für 50% Beladung liegt zwar noch über dem kritischen Wert „just admissible“, aber der Wert für eine Beladung von 100% liegt dann schon deutlich unter „disturbing“.

5.3.4 Abhängigkeit der de Boer Bewertungen von dem Nickwinkel der HDG

Bei dem Einstellprozess der Scheinwerfer wurde festgestellt, dass sich, bei gleicher Beladung der unterschiedlichen Fahrzeuge, stark unterschiedliche Werte des sich einstellenden Nickwinkels der Hell-Dunkel-Grenze ergeben. In der folgenden Abbildung 5.6 sind die Nickwinkel aller Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Beladung dargestellt.

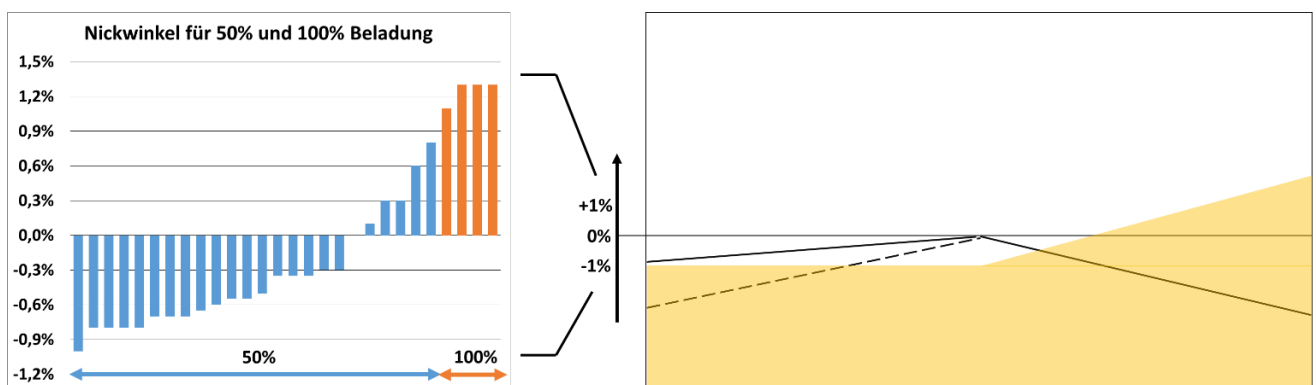


Abbildung 5.6: Nickwinkel der einzelnen Fahrzeuge (Balken) für 50% und 100% Beladung

Abbildung 5.6 zeigt deutlich, dass die einzelnen Fahrzeuge sich stark in ihrer Reaktion auf eine Beladung unterscheiden. Problematisch ist hierbei insbesondere, dass fünf der 24 Fahrzeuge schon bei einer Beladung von 50% einen positiven Nickwinkel der HDG erreichen. Ein positiver Nickwinkel bedeutet, dass die HDG über der Horizontallinie (0 %) des Scheinwerfers liegt und es somit zu einer verstärkten Blendung des Gegenverkehrs kommt. Zusätzlich erreichen alle 100% beladenen Fahrzeuge einen Nickwinkel von über +1%. Wegen der großen Inhomogenität der Nickwinkel wird im Folgenden der Blendeindruck in

Abhängigkeit von dem Nickwinkel betrachtet. In der nächsten Abbildung 5.7 sind die mittleren de Boer Bewertungen für die sich ergebenden Nickwinkel dargestellt. Hierbei sind die Bewertungen für Fahrzeuge, die denselben Nickwinkel generieren, zu einem Punkt zusammengefasst.

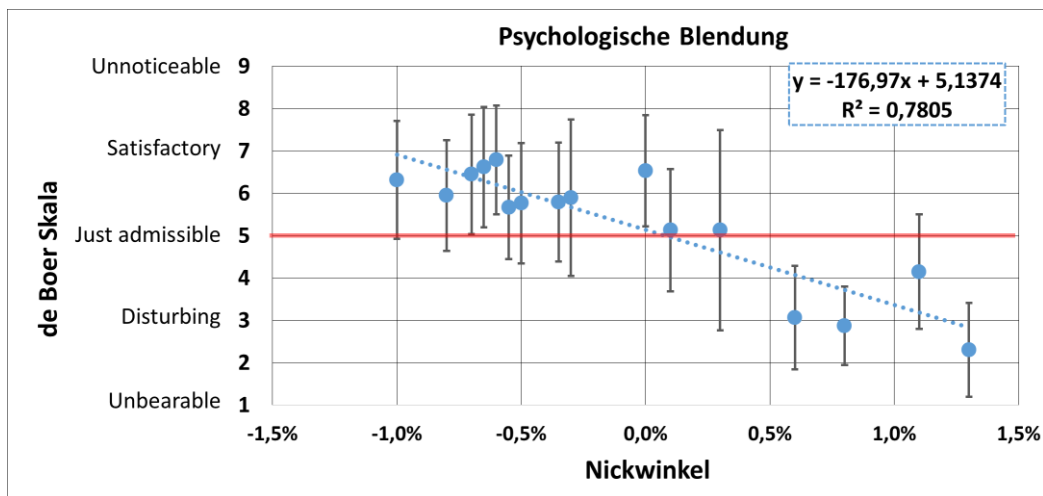


Abbildung 5.7: Mittlere psychologische Blendung in Abhängigkeit von dem Nickwinkel

Abbildung 5.7 zeigt, dass sich für einen von der ECE typischerweise vorgegebenen Nickwinkel von -1% (vgl. ECE R48 [9]) ein de Boer Wert von etwa 6,5 ergibt. Des Weiteren zeigt sich deutlich, dass ab einem Nickwinkel von über 0% die mittleren Bewertungen auf und unter die Bewertung „just admissible“ fallen und es somit zu einer zumindest gerade annehmbaren Blendung kommt. Demgegenüber sind alle Mittelwerte von Fahrzeugen mit Nickwinkeln $\leq 0\%$ deutlich über der Bewertung „just admissible“. Somit zeigt sich, dass der Nickwinkel 0% ein äußerst kritischer Grenzwinkel ist. Die teilweise erhöhte Standardabweichung lässt sich dadurch erklären, dass wie schon angesprochen in einem Datenpunkt teilweise mehrere Fahrzeuge abgebildet sind, die auch verschiedene Lampenarten beinhalten. Zur genaueren Untersuchung wird im nächsten Kapitel auf den Einfluss der Lampenarten eingegangen.

5.3.5 Vergleich der de Boer Bewertungen von Halogen-, Xenon- und LED-Scheinwerfern

In der folgenden Abbildung 5.8 sind die mittleren Blendbewertungen in Abhängigkeit des Nickwinkels dargestellt. Die Datenbasis für Abbildung 5.8 ist in Tabelle 5.3 dargestellt.

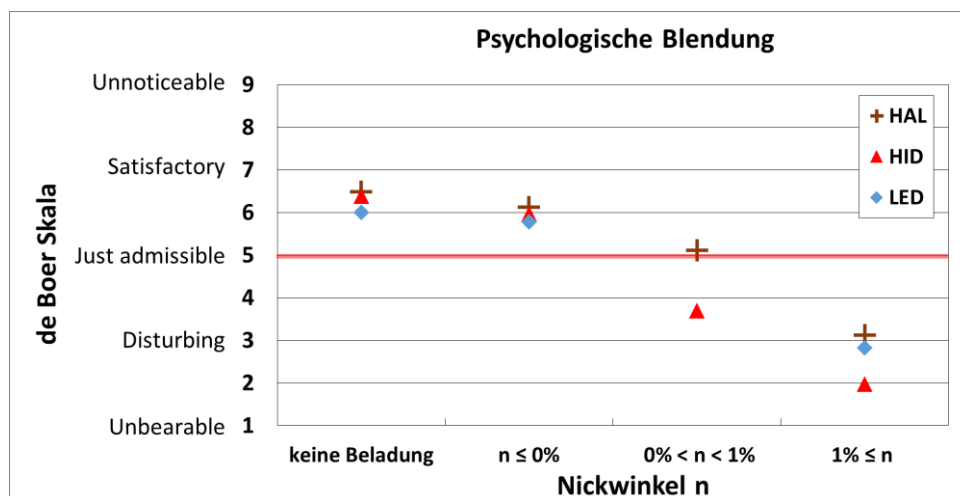


Abbildung 5.8: Mittlere psychologische Blendung in Abhängigkeit von Nickwinkel und Lampenart

Abbildung 5.8 zeigt, dass der Grenzwinkel von 0% zumindest hinsichtlich HAL und HID unabhängig von der Lampenart ist. In beiden Fällen rutscht die de Boer Bewertung auf und unter den Wert „just admissible“. Dieser Zusammenhang ist auch für LED zu vermuten, da im letzten Abschnitt ($1\% \leq n$) LED dicht bei den beiden anderen Lampenarten liegt, wobei alle drei Lampenarten hier zwischen „disturbing“ und „unbearable“ liegen. Des Weiteren ist zu sehen, dass falls ein Nickwinkel durch Beladung eintritt, HID den größten Einfluss auf das Blendniveau hat. HID liegt bei Nickwinkeln über dem Grenzwinkel 0% jeweils unter den beiden anderen Lampenarten. Hierbei unterscheidet sich HID signifikant von HAL in den beiden Bereichen mit Nickwinkeln über dem Grenzwinkel von 0%. In dem Bereich $n \leq 0\%$ ist der Unterschied zwischen HID und HAL nicht signifikant.

Um den Unterschied der Lampenarten für unbeladene Fahrzeuge mit korrekt eingestellten Scheinwerfern genauer zu analysieren ist in Abbildung 5.9 der erste Bereich (keine Beladung) von Abbildung 5.8 im Detail abgebildet.

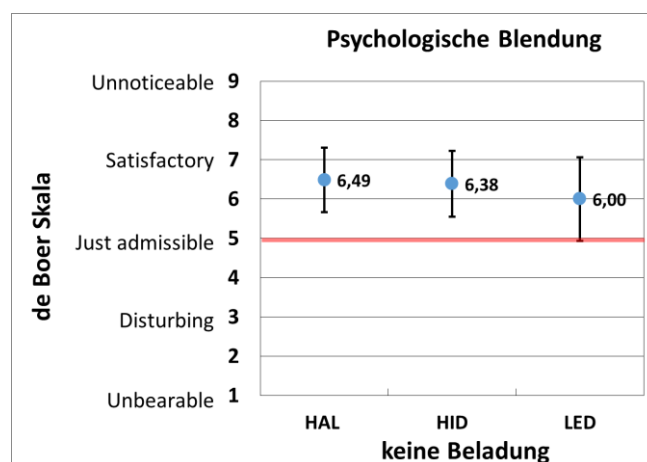


Abbildung 5.9: Mittlere psychologische Blendung (keine Beladung)

Abbildung 5.9 zeigt, dass zwischen HAL und HID kaum ein Unterschied besteht. Der Unterschied der Mittelwerte zwischen HAL und HID ist hierbei nicht signifikant. Dies bestätigt die Erkenntnis aus dem Feldtest zur Bestimmung der Blendung und Detektionsdistanz von blendfreiem Fernlicht (vgl. Kapitel 4), da auch hier kein signifikanter Unterschied der Blendung von HAL- und HID-Scheinwerfern festgestellt wurde. Der Unterschied der de Boer Bewertungen zwischen HID und LED, abgebildet in Abbildung 5.9, hingegen ist signifikant. Dies sollte aber nicht überbewertet werden, da die Bewertung immer noch deutlich über dem Wert „just admissible“ liegt.

Tabelle 5.3: Mittlere physiologische Blendung, Standardabweichung, Durchläufe

n = Nickwinkel	HAL			HID			LED		
	Mittelwert	Standardabweichung	Durchläufe	Mittelwert	Standardabweichung	Durchläufe	Mittelwert	Standardabweichung	Durchläufe
keine Beladung	6,49	0,81	11	6,38	0,84	8	6,00	1,06	4
$n \leq 0\%$	6,13	0,79	11	5,97	0,76	5	5,78	1,11	4
$0\% < n < 1\%$	5,12	0,93	2	3,70	0,81	3	-	-	0
$1\% \leq n$	3,13	0,90	2	1,98	0,87	1	2,83	1,32	1

5.3.6 Photometrische Auswertung

In der folgenden Auswertung werden die photometrischen Größen Beleuchtungsstärke E_v und Leuchtdichte L_v näher untersucht. Für die Beleuchtungsstärke wird hierbei der Datensatz verwendet, welcher in Augenposition des Fahrersitzplatzes aufgenommen wurde. Hinsichtlich der Leuchtdichte wird, in Anlehnung zum Blendpunkt B50L, der Datensatz verwendet, welcher in 50 m Distanz zum entgegenkommenden Fahrzeug aufgenommen wurde. Beide Messungen fanden hinter der Windschutzscheibe statt.

Die Beleuchtungsstärke wurde für jeden Durchlauf konstant über die Zeit gemessen $E_v(t)$. Hinsichtlich der Beleuchtungsstärke wurden zwei Auswertungen vorgenommen:

- Maximum der Beleuchtungsstärke E_{v_max}
- Mittlere Beleuchtungsstärke E_{v_mit} im Abstandsbereich 0 m – 400 m

Der Bereich der Mittelwertbildung wurde in Anlehnung an die Untersuchungen von Sprute [20] und an den zuvor beschriebenen Feldtest zur Bestimmung der Blendung und Detektionsdistanz von blendfreiem Fernlicht bewusst so gewählt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. Da durch die große Anzahl an Fahrzeugen keine Distanzmessung durchgeführt wurde, wird auf Basis der zeitlichen Beleuchtungsstärkeverläufe (Orientierung am Maximum) und der gegebenen Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h ein Wert für E_{v_mit} approximiert.

Für die Auswertung der Leuchtdichte wurden zunächst Bereiche der Leuchtdichteverteilung identifiziert, welche mindestens zwei Dekaden über dem Adaptationszustand der Probanden liegen und somit eine Übersteuerung des Sehapparats hervorrufen (vgl. Abbildung 5.10). Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Sehapparat einen Dynamikumfang von etwa vier Dekaden hat und der Adaptationszustand etwa die Mitte dieses Bereiches beschreibt (vgl. z.B. BODMANN [72] [73]). Als Adaptationszustand wurde die mittlere Gesichtsfeldleuchtdichte zu $L_{v_A} = 3,1 \text{ cd/m}^2$ bestimmt. Somit wurden nur Bereiche betrachtet mit Werten über $L_{v_B} \geq 310 \text{ cd/m}^2$.

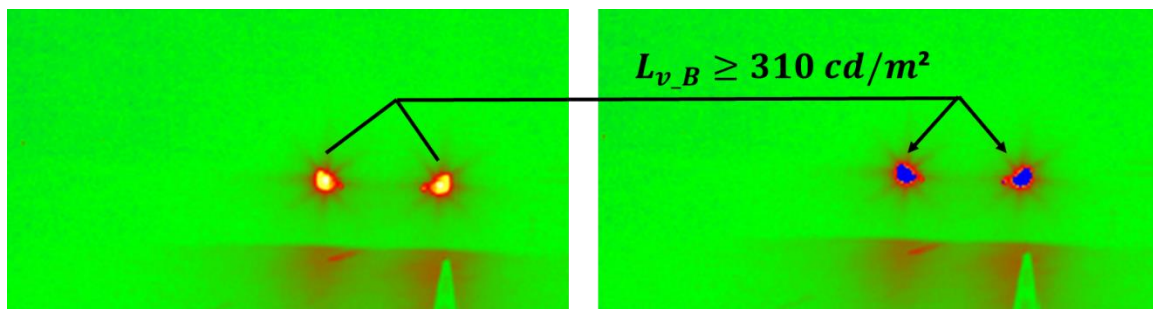


Abbildung 5.10: Flächenauswahl zur Auswertung der Leuchtdichte von Scheinwerfern

In der folgenden Abbildung 5.11 ist der oben definierte störende bzw. blendende Bereich der Leuchtdichteverteilung skizziert:

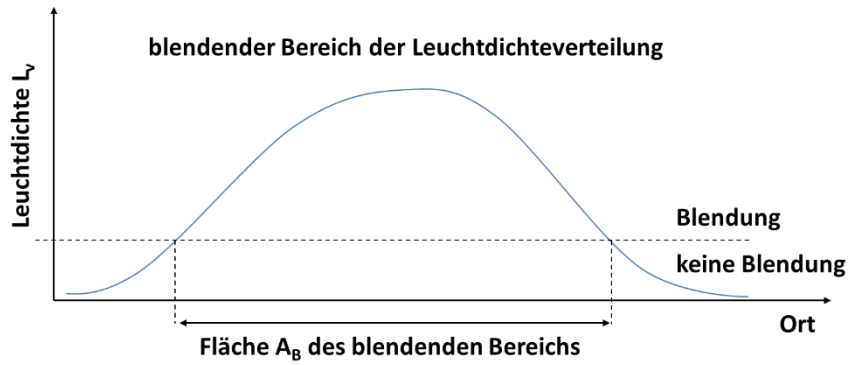


Abbildung 5.11: Blendender Bereich einer Leuchtdichteverteilung

Für die Charakterisierung des blendenden Bereiches wurden für jeden Durchlauf die folgenden Parameter untersucht:

- Fläche A_B über dem Grenzwert 310 cd/m^2 in Pixelanzahl
- Mittlere Leuchtdichte L_{v_mit} in Fläche A_B
- Maximale Leuchtdichte L_{v_max} in Fläche A_B
- Standardabweichung der Leuchtdichte σ_L in Fläche A_B

Für die weitere Analyse der photometrischen Größen werden diese mit den durchschnittlichen Blendebewertungen der einzelnen Durchläufe mathematisch in Verbindung gebracht. Hierfür werden die photometrischen Größen als photometrischer Reiz R_p betrachtet, der in den Probanden eine psychologische Blendempfindung $W_p(R_p)$ hervorruft. Des Weiteren werden auf Basis der de Boer Skala die folgenden Grenzbedingungen definiert:

$$\lim_{R_p \rightarrow 0} W_p(R_p) = 9 \stackrel{\text{def}}{=} \text{"unnoticeable glare"} \quad (5-1)$$

$$\lim_{R_p \rightarrow \infty} W_p(R_p) = 1 \stackrel{\text{def}}{=} \text{"unbearable glare"} \quad (5-2)$$

Die Nebenbedingungen beschreiben demnach die obere und untere Grenze der de Boer Skala. Etablierte mathematische Verknüpfungen zwischen einem Reiz und einer Empfindung sind die Gesetze von Weber-Fechner oder Stevens [74] [75]. Im Falle von Weber-Fechner wird der Reiz logarithmiert, im Falle von Stevens potenziert. In beiden Fällen können demnach die beiden Nebenbedingungen zusammen nicht eingehalten werden. Zur Umsetzung der Grenzbedingungen wird auf eine Sigmoid- oder S-Funktion zurückgegriffen.

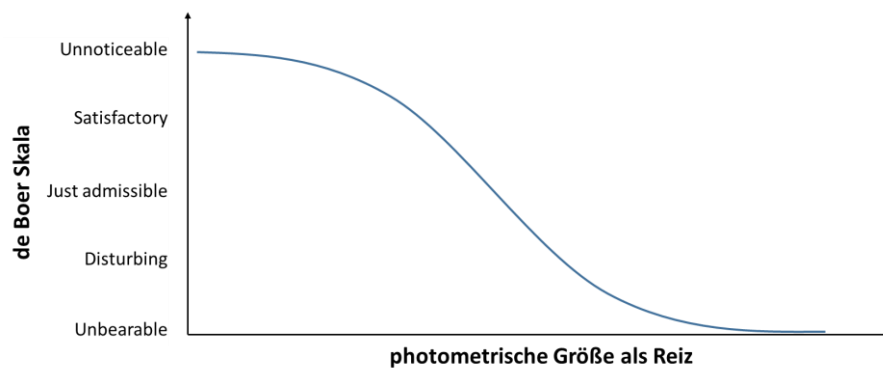


Abbildung 5.12: Sigmoid- oder S-Funktion

Häufig werden S-Funktionen verwendet zur Beschreibung von psychometrischen Zusammenhängen wie zur Beschreibung von Wahrnehmungsschwellen [76] oder zur Beschreibung von Pupillengrößen in Abhängigkeit der Leuchtdichte [77]. Eine weiter bekannte Verwendung ist die von NAKA und RUSHTON, welche mittels einer S-Funktion eine Zapfenreaktion auf Lichtblitze beschreiben [78].

Um zu analysieren, welchen Einfluss die einzelnen photometrischen Reize auf die de Boer Bewertung der Probanden haben, werden die durchschnittlichen de Boer Bewertungen für jeden Durchlauf gegenüber den jeweiligen photometrischen Reizen der Durchläufe aufgetragen. Anschließend wird jeweils eine an die Naka-Rushton-Funktion angelehnte S-Funktion an diese Verläufe angepasst. Im Folgenden ist die verwendete S-Funktion dargestellt.

$$S - \text{Funktion: } W_{NR} = m * \frac{R_L^n}{R_L^n + h^n} + k \quad (5-3)$$

Die Funktionsanpassungen werden mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate unter Veränderung der Parameter m, n, h und k durchgeführt. Die sich ergebenden Verläufe sind in der folgenden Abbildung 5.13 dargestellt.

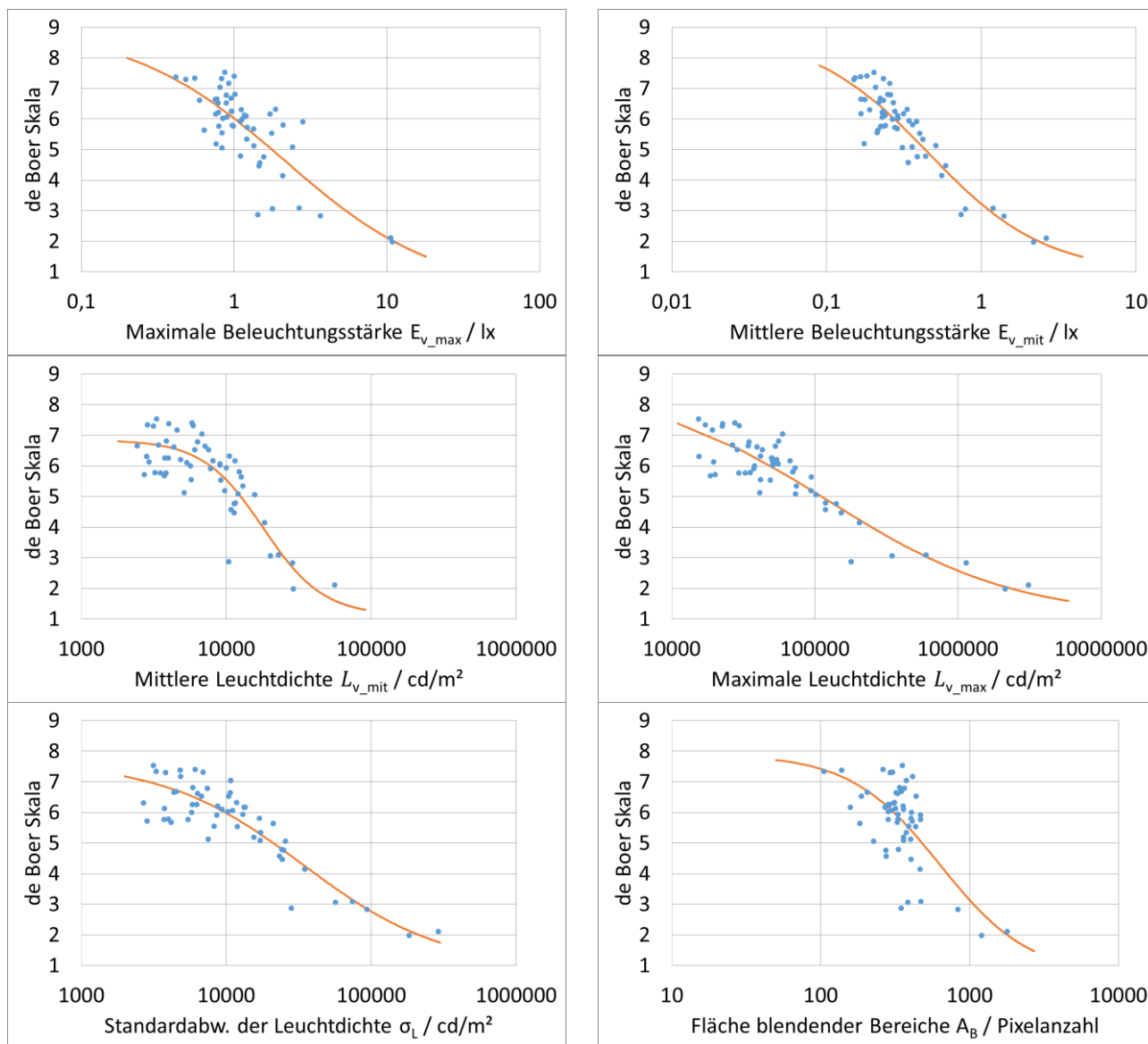


Abbildung 5.13: Angepasste S-Funktionen der photometrischen Größen

Um die Güte der angepassten S-Funktionen besser vergleichen zu können, wurden die folgenden Maßzahlen berechnet und in Tabelle 5.4 dargestellt:

- Summe der Fehlerquadrate S
- Mittlere Absolutdifferenz der de Boer Bewertungen zur angepassten Funktion ΔW_{mit}
- Standardabweichung der Absolutdifferenzen $\sigma_{\Delta W}$
- Bestimmtheitsmaß R^2

Tabelle 5.4: Maßzahlen zur Beurteilung der S-Funktion Anpassungen

	$E_v \max$	$E_v \text{ mit}$	$L_v \text{ mit}$	$L_v \max$	σ_L	A_B
S	38,38	17,01	32,10	17,99	21,99	55,52
ΔW_{mit}	0,63	0,45	0,60	0,45	0,49	0,76
$\sigma_{\Delta W}$	0,53	0,32	0,47	0,36	0,40	0,65
R^2	0,70	0,87	0,75	0,86	0,83	0,57

Abbildung 5.13 und Tabelle 5.4 zeigen, dass die mittlere Beleuchtungsstärke E_{v_mit} und die maximale Leuchtdichte L_{v_max} die geeignetsten Größen sind, um anhand dieser eine möglichst genaue Aussage über die Blendung von Scheinwerfern zu treffen. Die angepassten S-Funktionen dieser Größen erreichen ein Bestimmtheitsmaß von 0,87 bzw. 0,86, und die mittlere Differenz der Funktionswerte der angepassten S-Funktionen zu den eigentlichen de Boer Mittelwerten der Durchläufe liegt bei 0,32 bzw. 0,36 de Boer Stufen. Die Aussagen gelten vorbehaltlich nur unter der Annahme, dass die psychologische Blendung einer S-Funktion folgt. Die photometrischen Größen wurden aber zur Überprüfung auch mittels des Weber-Fechner-Gesetzes angepasst, wobei sich ebenso herausstellte, dass die Größen E_{v_mit} und L_{v_max} die geeignetsten sind.

Zur Überprüfung der Beziehung zwischen den de Boer Bewertungen und der photometrischen Größe E_{v_mit} werden die Ergebnisse dieses Feldtestes mit denen des Feldtestes zur Bestimmung der Blendung und Detektionsdistanz von blendfreiem Fernlicht in der folgenden Abbildung 5.14 dargestellt. Zusätzlich sind Ergebnisse von SIVAK et. al. [79] abgebildet, welche an sechzehn Probanden in einer Laboruntersuchung unter einem festen Blendwinkel von $3,6^\circ$ entstanden sind.

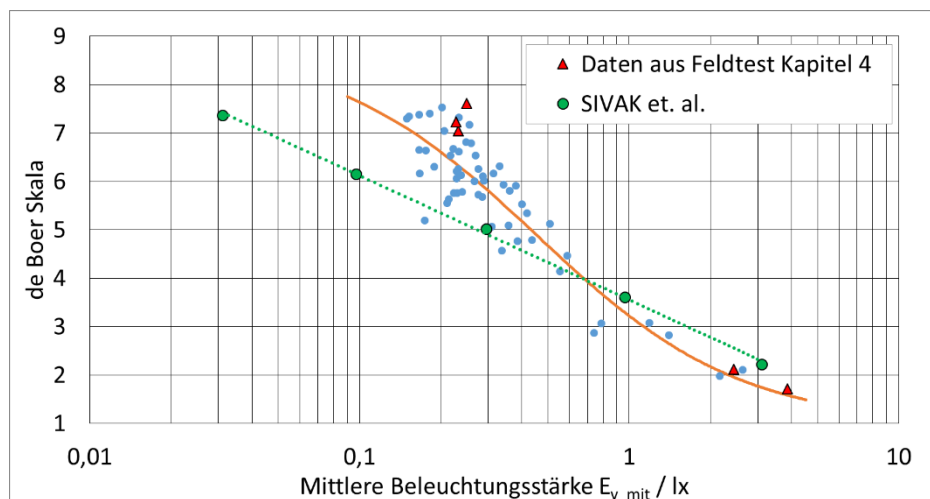


Abbildung 5.14: Vergleich der mittleren Beleuchtungsstärke mit SIVAK et. al. und Feldtest Kapitel 4

Die fünf dreieckig dargestellten Datenpunkte stehen für HID Abblendlicht, HID Fernlicht, HID blendfreies Fernlicht, HAL Abblendlicht und HAL Fernlicht (vgl. Kapitel 4.4.1). Wobei die Gruppe der drei Datenpunkte mit niedrigeren Beleuchtungsstärken blendfreies Fernlicht und Abblendlicht repräsentieren. Die beiden Datenpunkte mit höheren Beleuchtungsstärken stehen für das jeweilige Fernlicht. Abbildung 5.14 zeigt, dass die Ergebnisse beider Feldtests gut zu vergleichen sind, wobei die fünf Datenpunkte tendenziell etwas höhere Beleuchtungsstärkewerte zeigen, was dadurch zu erklären ist, dass im Gegensatz zu diesem Feldtest vor der Windschutzscheibe gemessen wurde. Die Ergebnisse von SIVAK sind zum Vergleich mit einem Labortest unter einem festen Blendwinkel und statischen Blendbeleuchtungsstärken abgebildet. Interessant ist hierbei, dass sich die Ergebnisse durchaus ähneln. Insbesondere der Durchtritt durch den de Boer Wert $W = 5$ „just admissible“ liegt sehr nahe an dem Durchtritt der angepassten S-Funktion (0,3 lx zu 0,4 lx). Es sei nochmal darauf hingewiesen, dass die Blendbewertungen, welche in diesem Feldtest entstanden sind, sich auf einen kompletten Durchlauf beziehen und demnach nicht an einen festen Blendwinkel gebunden sind.

Zur Überprüfung der Beziehung zwischen den de Boer Bewertungen und der photometrischen Größe L_{v_max} werden die Daten mit der Untersuchung von RAPHAEL [8] verglichen. RAPHAEL untersuchte im Lichtkanal in einem statischen Versuch unter anderem die Reaktion von Probanden auf Scheinwerfer

unterschiedlicher Leuchtdichten in einer entgegenkommenden Verkehrssituation. Hierbei wurde eine Verkehrssituation mit einer Distanz zu einem entgegenkommenden Fahrzeug von 50 m simuliert. Die Ergebnisse sind mit den Ergebnissen dieses Feldtests in der folgenden Abbildung 5.15 dargestellt. Im Falle von RAPHAEL sind mittlere Leuchtdichten aufgetragen, wobei die Scheinwerfer in der Untersuchung von RAPHAEL so homogen wie möglich gehalten wurden und sich demnach die durchschnittlichen Leuchtdichten kaum von den Maximalleuchtdichten unterscheiden.

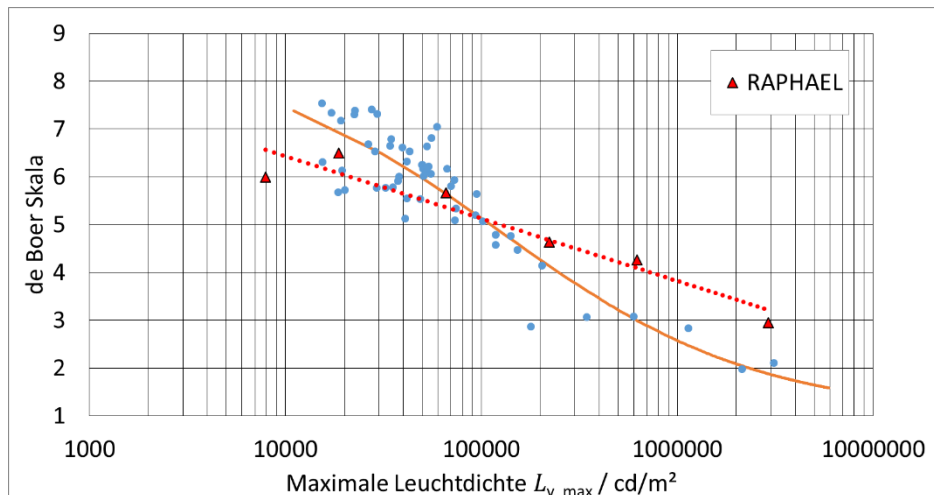


Abbildung 5.15: Vergleich der maximalen Leuchtdichte mit RAPHAEL

Abbildung 5.15 zeigt, dass die Ergebnisse des Lichtkanals einen sehr ähnlichen photometrischen Wert für den de Boer Wert $W = 5$ „just admissible“ zeigen.

Die Untersuchungen von SIVAK et. al. und von RAPHAEL zeigen beide eine geringere Steigung des funktionellen Zusammenhangs zwischen photometrischer Größe und Blendbewertung. Demnach führt eine Veränderung des photometrischen Wertes zu einer kleineren Änderung des Blendeindrucks. Dies kann entweder durch die anderen Bewertungsverfahren der Blendung in den Laboruntersuchungen oder durch die statische Positionierung der Blendquellen begründet sein.

Die gewonnene Erkenntnis dieses Feldtests, dass ab einem Nickwinkel von 0% die Blendung sehr stark ansteigt, wurde in Abbildung 5.8 anhand der de Boer Bewertungen dargestellt. Zur Begründung dieses Zusammenhangs werden in der folgenden Abbildung 5.16 die beiden photometrischen Größen E_{v_mit} und L_{v_max} gegenüber dem Nickwinkel aufgetragen.

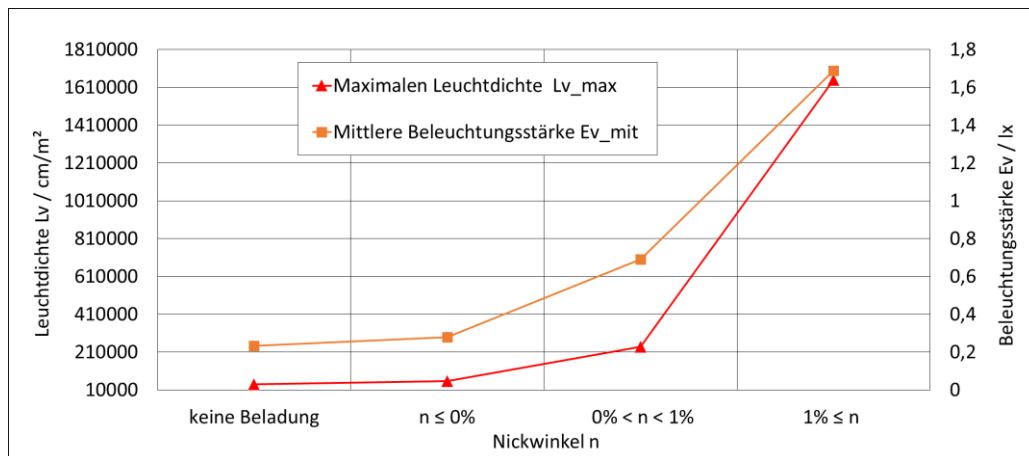


Abbildung 5.16: Verhalten von E_{v_mit} und L_{v_max} in Abhängigkeit des Nickwinkels

Abbildung 5.16 zeigt, dass ab einem Nickwinkel von 0% die photometrischen Werte stark ansteigen. Für kleinere Nickwinkel ist kaum ein Anstieg der Werte zu verzeichnen. Der starke Anstieg der Blendung (Verringerung der de Boer Bewertung) ab einem Nickwinkel von 0%, welcher in Abbildung 5.8 veranschaulicht ist, lässt sich demnach mit dem starken Anstieg der photometrischen Werte begründen. Um zusätzlich zwischen den einzelnen Lampenarten besser unterscheiden zu können, sind in der folgenden Abbildung 5.17 die Verläufe der photometrischen Werte in Abhängigkeit des Nickwinkels und der Lampenarten dargestellt.

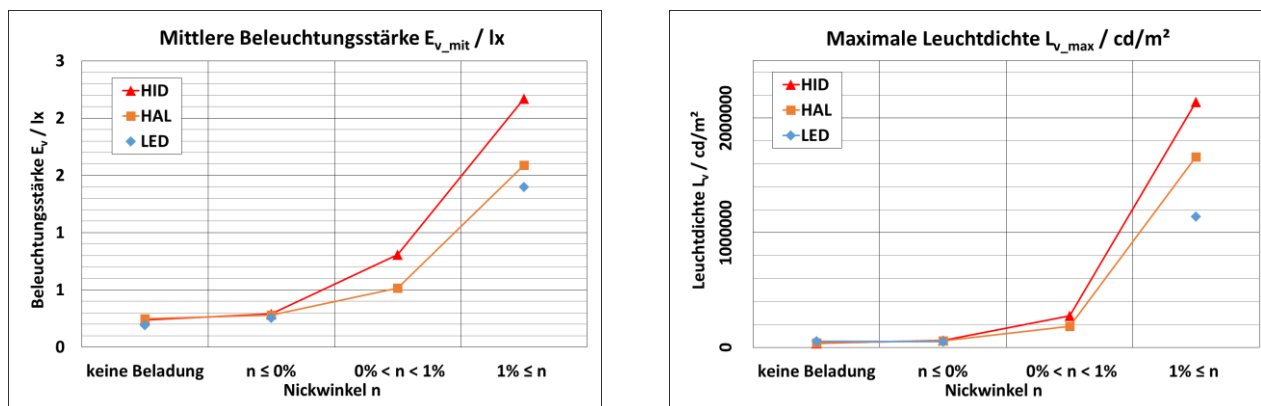


Abbildung 5.17: Verhalten von E_{v_mit} und L_{v_max} in Abhängigkeit des Nickwinkels und Lampenart

Abbildung 5.17 zeigt, dass ab einem Nickwinkel von 0% die HID-Scheinwerfer höhere Werte der photometrischen Größen im Vergleich zu den HAL- und LED-Scheinwerfern aufweisen. Dieser Umstand verursacht demnach, dass die HID-Scheinwerfer bei Nickwinkeln größer als 0% eine erhöhte Blendung gegenüber HAL- und LED-Scheinwerfern hervorrufen (vgl. Abbildung 5.8). Begründen lässt sich dies durch den sehr hohen Lichtstrom, mit dem ein HID-Scheinwerfer eine Abblendlichtverteilung erzeugt. Ab einem Nickwinkel von größer als 0% liegt die HDG über der Horizontallinie, und somit werden die Augenpaare des Gegenverkehrs zeitweilen (je nach Abstand und Nickwinkel) mit Bereichen der Lichtstärkeverteilung angestrahlt, die unter der HDG liegen.

Zum Abschluss dieses Unterkapitels sind in der folgenden Abbildung 5.18 die beiden photometrischen Größen E_{v_mit} und L_{v_max} gegeneinander aufgetragen.

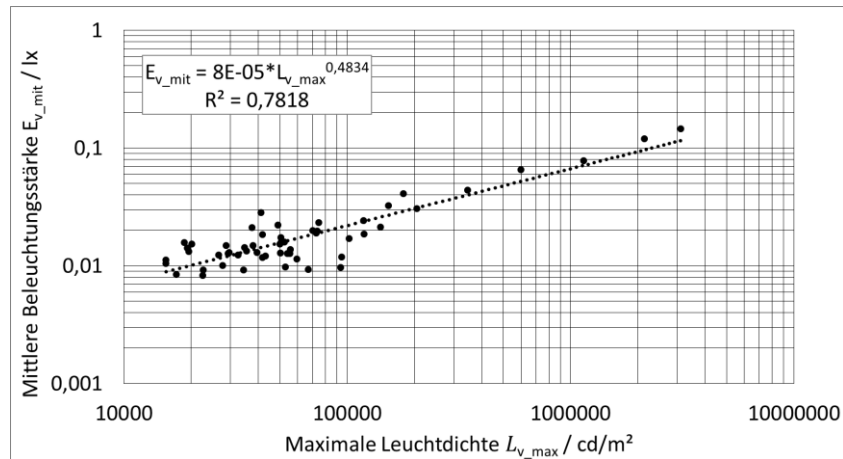


Abbildung 5.18: Verhalten von E_{v_mit} zu L_{v_max}

5.4 Abhängigkeit der Feldtestergebnisse von Probandeneigenschaften

Der beschriebene Feldtest wurde mit 47 Probanden durchgeführt. Diese Probanden machten hierbei ca. 2800 Blendungsbewertungen auf Basis der de Boer Skala. Diese relativ große Probanden- und Bewertungsbasis wird im Folgenden dahingehend untersucht, in wie weit das Probandenalter oder eine Sehhilfe einen Einfluss auf die Blendungsbewertung hat. Da in dem Feldtest nur vier der 47 Probanden weiblich waren, wird von einer Untersuchung eines potentiellen Einflusses des Probandengeschlechts abgesehen.

Die folgende Abbildung 5.19 zeigt die mittlere de Boer Bewertung jedes einzelnen Probanden in Abhängigkeit des Probandenalters. Demnach besteht die folgende Abbildung aus 47 Datenpunkten, ein Punkt für jeden Probanden. Jeder Datenpunkt entspricht hierbei dem Mittelwert aller in dem Feldtest getätigten de Boer Bewertungen des jeweiligen Probanden.

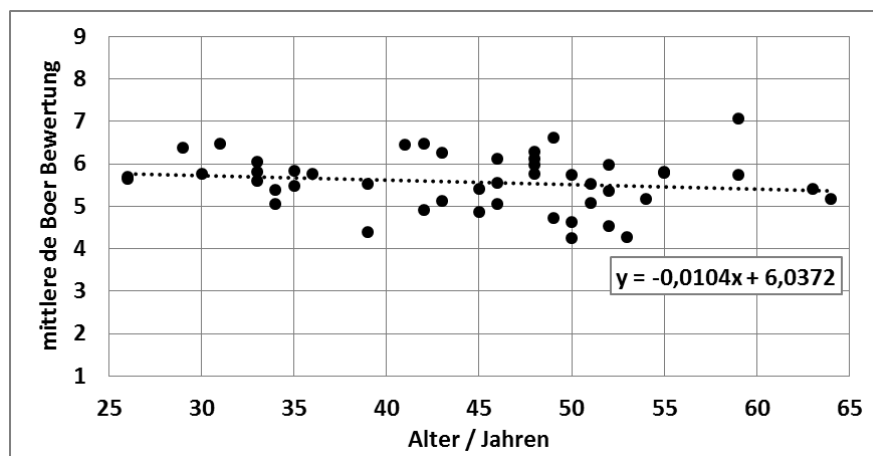


Abbildung 5.19: Mittlere psychologische Blendung in Abhängigkeit des Alters

Abbildung 5.19 zeigt, dass die Daten des Feldtests, wenn überhaupt, einen minimalen Einfluss des Alters zeigen. Die dargestellte Trendlinie hat eine geringfügig negative Steigung, was wiederum einem Abfall der de Boer Bewertungen mit dem Alter, also einem Anstieg der psychologischen Blendung entspricht. Eine alleinige Betrachtung von unterschiedlichen Nickwinkelbereichen hat hierbei auch keine eindeutige

Altersabhängigkeit gezeigt. In den Umfrageergebnissen (vgl. Kapitel 3 und Abbildung 3.23) hat sich ebenso eine geringe, aber zweifellosere Altersabhängigkeit einer gefühlten Blendungshäufigkeit ergeben. Jedoch kann bei der Bewertung einer gefühlten Blendungshäufigkeit nicht davon ausgegangen werden, dass durch die Umfrageteilnehmer nur eine psychologische Blendwirkung beurteilt wird.

Insgesamt waren 27 der 47 Probanden Brillenträger. Ein Proband trug Kontaktlinsen, dieser ist aus der folgenden Betrachtung herausgenommen. Die folgende Abbildung 5.20 zeigt die mittlere Bewertung der psychologischen Blendung für die Probanden mit und ohne Brille.

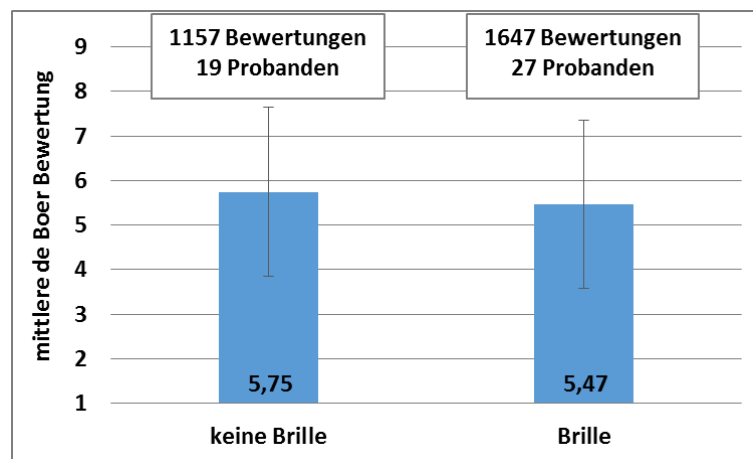


Abbildung 5.20: Mittlere psychologische Blendung in Abhängigkeit der Sehhilfe

Abbildung 5.20 zeigt, dass die Bewertung der Probanden, die eine Brille tragen, sich kaum von der Bewertung der Probanden, welche keine Brille tragen, unterscheidet. Der mittlere de Boer Wert der Brille tragenden Probanden ist zwar leicht niedriger, da sich die Standardabweichungen aber doch sehr deutlich überschneiden, kann hier höchstens von einer Tendenz gesprochen werden.

5.5 Fazit

Das Ziel dieses Feldtestes war es, eventuell mögliche Ausnahmen einer obligatorischen automatischen Leuchtweitenregelung zu identifizieren und eine Daten- und Argumentationsgrundlage für Entscheidungen innerhalb der GTB und GRE zur Verfügung zu stellen. Die Ergebnisse des Feldtestes basieren auf den Einschätzungen von 47 Probanden, welche ca. 2800 psychologische Blendungsbewertungen von 25 Serienfahrzeugen mit unterschiedlichen Lampenarten bei unterschiedlichen Beladungszuständen abgegeben haben.

Auf Basis der beschriebenen Testbedingungen und ermittelten Daten erlaubt der Feldtest, die folgenden Schlüsse zu ziehen:

- Bei einer maximalen Beladung von 100% kommt es zu einer psychologischen Blendung, die im Mittel ein Wert von $W = 2,77$ ($3 \triangleq$ "disturbing") erreicht. Bei einer Beladung von 50% ergibt sich ein Wert von $W = 5,67$ ($5 \triangleq$ "just admissible").
- Bei gleichen Ladungsbedingungen erreichen die Fahrzeuge stark unterschiedliche Nickwinkel. Da dieser wiederum einen direkten Einfluss auf die Lage der Lichtstärkeverteilung im Verkehrsraum hat, wurde der Hauptteil der Auswertung auf den Nickwinkel bezogen.

- Ein Nickwinkel von 0% kann hinsichtlich der psychologischen Blendung als Grenzwinkel betrachtet werden: Bei Fahrzeugen, die bei Beladung unter diesem Nickwinkel bleiben, kommt es im Vergleich zu den de Boer Werten ohne Beladung nur zu einer geringfügigen Veränderung. Dies ist unabhängig von der Lampenart. Bei einem Nickwinkel größer als 0% und kleiner als 1% gehen die Blendbewertungen der HID Fahrzeuge deutlich unter „just admissible“ in Richtung „disturbing“. HAL Fahrzeuge liegen hier bei einer mittleren Blendbewertung von „just admissible“. Bei Nickwinkeln von 1% und mehr kommt es unabhängig von der Lampenart zu einer mittleren Blendungsbewertung von mindestens „disturbing“. Dieser Bereich beinhaltet alle Fahrzeuge, die mit einer Beladung von 100% gefahren sind.
- Von den sechs analysierten photometrischen Größen eignen sich die mittlere Beleuchtungsstärke und die maximale Leuchtdichte am ehesten zur Abschätzung der psychologischen Blendung.
- Wie auch in dem Feldtest zur Bestimmung der Blendung und Detektionsdistanz von blendfreiem Fernlicht hat sich hier gezeigt, dass sich korrekt eingestellte HID- und HAL-Scheinwerfer hinsichtlich einer von ihnen ausgehenden Blendung nicht unterscheiden. Kommt es aber zu einer Beladung und es stellt sich ein Nickwinkel größer als 0% ein, so unterscheiden sich HID-Scheinwerfer signifikant von HAL-Scheinwerfern. Sie sind unter Beladung demnach als wesentlich kritischer zu betrachten.

Der Feldtest zeigt, dass die aktuell gültige Kopplung einer obligatorischen Leuchtweitenregelung an einen bestimmten Lampenlichtstrom oder an den Lampentyp LED nicht zielführend ist. Wird ein Fahrzeug im zulässigen Rahmen maximal beladen, so ist zu erwarten, dass es unabhängig von der Lampenart und des Lampenlichtstromes zu einer starken Blendung des Gegenverkehrs kommt. Hierbei ist die Stärke der Blendung an den Nickwinkel des Fahrzeuges und damit an dessen Fahrwerk gekoppelt. Eine Ausnahme für eine obligatorische automatische Leuchtweitenregelung könnte demnach an das Fahrwerksverhalten bzw. an den Nickwinkel des Fahrzeuges gebunden sein. Wobei hier ein deutlicher Abstand zu dem Grenzwinkel von 0% gehalten werden sollte, um bei dynamischen Nickbewegungen noch einen Puffer nach oben zu lassen. Alternativ wären konkrete photometrische Grenzwerte denkbar, die für alle zulässigen Beladungszustände nicht überschritten werden dürfen.

6 Laboruntersuchung zur spektralen physiologischen Blendung

Dieses Kapitel beschreibt eine Laboruntersuchung zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit der physiologischen Blendung. Die Laboruntersuchung wurde durchgeführt, da mit der vermehrten Verwendung der LED für Kraftfahrzeugscheinwerfer auch eine vermehrte Verwendung einer spektralen Strahlungszusammensetzung im Straßenverkehr einhergeht, welche einen relativ großen Blauanteil besitzt. Vorhergehende Untersuchungen zur spektralen Detektionsempfindlichkeit im mesopischen Bereich haben, im Vergleich zur $V(\lambda)$ Funktion, eine Verschiebung der Empfindlichkeit in Richtung kürzerer Wellenlängen gezeigt (vgl. z.B. FREIDING [80] und BODROGI et. al. [81]). Dies wirft die Frage auf, in wie weit die spektrale Empfindlichkeit der physiologischen Blendung im mesopischen Adaptationsbereich ebenso eine erhöhte Empfindlichkeit für spektrale Strahlungsverteilungen mit relativ großem Blauanteil vorweist. Die im Folgenden beschriebene Laboruntersuchung hatte somit das Ziel, die spektrale Empfindlichkeit der physiologischen Blendung zu bestimmen, um so einen eventuellen Unterschied zur aktuell verwendeten $V(\lambda)$ Funktion hinsichtlich unterschiedlicher Lampenarten zu beurteilen.

Die Ergebnisse der Untersuchung wurden zum Teil auf dem International Symposium on Automotive Lighting 2011 [82] und auf der Automotive Lighting Conference 2012 [83] publiziert.

6.1 Einleitung

Gängige Modelle zur physiologischen Blendungsbewertung, wie z.B. von HOLLADAY [19], CARRARO [84] oder der CIE [24], verwenden photometrische Größen (vgl. Kapitel 2.1.2). Demnach wird die radiometrische Leistung einer Blendquelle mit der Hellempfindlichkeit für das Tagessehen $V(\lambda)$ spektral gewichtet und mit dem photometrischen Strahlungsäquivalent für das Tagessehen K_m multipliziert. Anschließend wird mit diesem nun photometrischen Wert, unter Beachtung von Randbedingungen wie z.B. dem Blendwinkel, ein blendungsbeschreibender Parameter wie eine Schleierleuchtdichte oder ein Schwellenleuchtdichteunterschied berechnet. Ebenso werden photometrische Größen in den Kfz-Scheinwerferregulierungen der ECE eingesetzt. So wird z.B. in der Regelung R8 der Punkt B50L zur Begrenzung der Blendung von Abblendlicht mit einem Beleuchtungsstärkewert von $E_v = 0,4 \text{ lx}$ beschrieben (für Halogenscheinwerfer vgl. [85]). Der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ spielt demnach eine zentrale Rolle in der Blendungsbewertung von Scheinwerfern.

Der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ wurde 1924 durch die CIE veröffentlicht [86]. Die Werte für $V(\lambda)$ basieren hierbei auf einer Arbeit von GIBSON und TYNDALL [87], welche durch den Vergleich einer eigenen Untersuchung mit vorhergehenden Untersuchungen 1923 einen Vorschlag für eine $V(\lambda)$ Funktion machten. Hauptsächlich verknüpften sie die Funktionen der vorhergehenden Untersuchungen zu einer einheitlichen Funktion zur Beschreibung der spektralen Hellempfindlichkeit. Der größte Anteil der $V(\lambda)$ Funktion basiert hierbei auf einer Funktion der Illuminating Engineering Society (Abk.: I.E.S), deren Entstehung hingegen unbekannt ist. Die $V(\lambda)$ Funktion besteht demnach aus unterschiedlichen Versuchsergebnissen, deren Daten durch Helligkeitsabgleiche gewonnen wurden. Wobei auch hinsichtlich der Methodik der Helligkeitsabgleiche in den jeweiligen Untersuchungen zwei verschiedene Verfahren zum Einsatz gekommen sind: Flimmerfotometrie und Kleinstufenverfahren. Ebenso sind die Versuche zumeist unter mesopischen Adaptationsleuchtdichten durchgeführt worden. Die Größe des foveal betrachteten Abgleichfeldes lag bei den Untersuchungen im Bereich zwischen $1,5^\circ$ und 7° . Demnach kann

davon ausgegangen werden, dass nicht nur Zapfen, sondern auch Stäbchen an der Form der $V(\lambda)$ Funktion beteiligt waren. Für weitere Information zur Entstehung, Historie und Beurteilung der $V(\lambda)$ Funktion sei auf die Arbeiten von KHANH [88] [89], VIIKARI et. al. [90], SCHANDA [91] und SCHÄFER [92] verwiesen.

Die Motivation der Erschaffung der $V(\lambda)$ Funktion war, die spektrale Hellempfindung des Menschen unter photopischen Adaptationsbedingungen möglichst präzise zu beschreiben und somit eine einheitliche Photometrie zu realisieren. Alleine diese Motivation wirft die Frage auf, in wie weit die $V(\lambda)$ Funktion in der Lage ist, die spektrale Empfindlichkeit der physiologischen Blendung unter mesopischen Nachtfahrbedingungen zu beschreiben. Die Fragestellung wird unterstützt durch die Tatsache, dass die physiologische Blendung nach HOLLADAY [19] durch Streulicht, welches in den Augenmedien entsteht, verursacht wird. Die folgende Untersuchung soll die Frage klären, ob und in wie weit sich das spektrale physiologische Blendverhalten unter mesopischen Nachtfahrbedingungen von dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ unterscheidet. Zur Klärung dieser Fragestellung wurde eine Laboruntersuchung unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt.

6.2 Methodik

Zur Untersuchung des spektralen Verhaltens der physiologischen Blendung wurde eine spezielle Box aufgebaut. Die Box hatte an ihrer Vorderseite eine Öffnung, in der eine Kopfstütze montiert war. Der jeweilige Proband musste während des Versuchsablaufes seinen Kopf auf der Kopfstütze ablegen und unter Blendung eine an der inneren Rückwand der Box dargestellte Sehaufgabe lösen. Die geometrischen Bedingungen sind in der folgenden Abbildung 6.1 dargestellt.

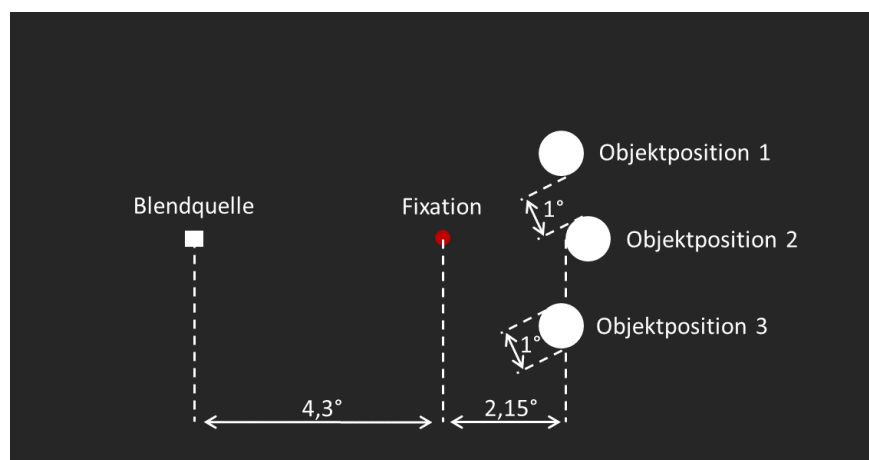


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung und Geometrie der Sehaufgabe

Die Sehaufgabe bestand darin, auf einen Fixationspunkt zu schauen und peripher Objekte zu erkennen. Die Geometrie der Sehaufgabe war hierbei an eine Fahrspurbreite von 3,75 m und eine Verkehrssituation mit einem in 50 m Abstand entgegenkommenden Fahrzeug angelehnt. Das zu detektierende Objekt wurde vom Fixationspunkt aus $2,15^\circ$ nach rechts versetzt an einer von drei, radial um den Fixationspunkt verteilten, möglichen Objektpositionen dargestellt. Die Objektgröße betrug 1° . Diese geometrischen Bedingungen entsprechen einem Objekt in 50 m Entfernung mit einer Größe von 0,87 m am rechten Straßenrand. Die Blendquelle hatte eine Größe von 0,2 m mal 0,2 m, in einem gedachten Abstand von 50 m. Die folgende Abbildung 6.2 zeigt ein Schwarz-Weiß-Bild der Sehaufgabe einmal ohne und einmal mit aktivierter Blendquelle. Die Detektionsobjekte sind hierbei nur zur besseren Erkennbarkeit gleichzeitig aktiviert.

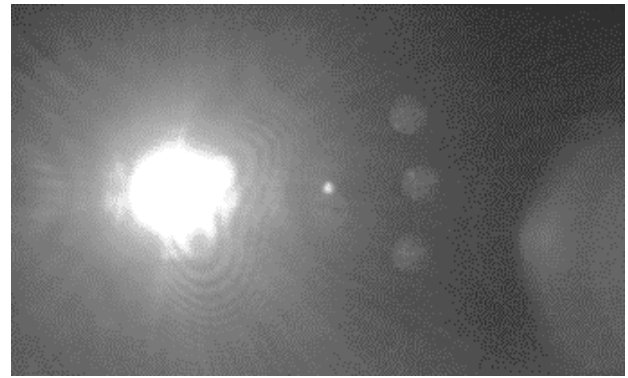
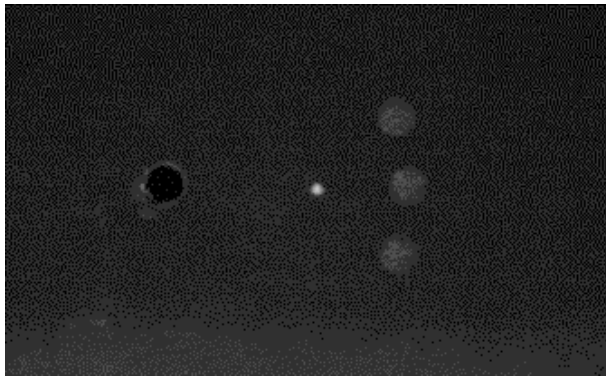


Abbildung 6.2: Sehaufgabe ohne und mit Blendung (zu Darstellungszwecken alle Objekte leuchtend)

Wie zuvor beschrieben und in Abbildung 6.1 dargestellt, konnte das Detektionsobjekt an einer von drei möglichen Objektpositionen erscheinen. Dies hat den Vorteil, dass so die Ratewahrscheinlichkeit auf $P_{rate} = 1/3$ reduziert werden kann, wobei die Probanden dazu angehalten wurden, ein Raten zu vermeiden. Zu Adaptationszwecken wurde der Hintergrund der Box mittels vier weißer LEDs beleuchtet. Die LEDs wurden mit einer Konstantstromquelle (Abk. CCS für engl. „constant current source“) so gedimmt, dass sich auf der inneren Boxrückwand eine mittlere Leuchtdichte von $0,1 \text{ cd/m}^2$ ergab. In direkter Objektumgebung stellte sich hierbei eine Leuchtdichte von $0,07 \text{ cd/m}^2$ ein. Die Blendquelle wurde mit einer LED vom Typ Cree XM-L T6 realisiert, welche durch eine computergesteuerte Konstantstromquelle vom Typ Hameg HM7044 mit elektrischer Leistung versorgt wurde. Somit konnte die Blendquelle hinsichtlich ihres Strahlungsflusses bzw. ihrer Strahldichte eingestellt werden. Um die Stabilität der Blendquelle sicherzustellen, wurde diese mittels eines Peltier-Elements in ihrer Temperatur stabilisiert. Das Peltier-Element wurde hierbei durch einen Temperaturcontroller vom Typ Thorlabs ITC4005 betrieben. Um einen quasi-monochromatischen Blendreiz erzeugen zu können, wurde vor die Blend-LED ein einstellbarer Flüssigkristallfilter (Abk. LCTF von engl. „liquid crystal tunable filter“) vom Typ CRi VariSpec VIS installiert. Der Filter ermöglicht eine einstellbare Filterung mit einer Halbwertsbreite von ca. 7 nm. Die drei Detektionsobjekte wurden durch drei LEDs mit vorgesetzten Streuscheiben realisiert und mit einem Mikrocontroller (Abk.: μC) angesteuert. Die LEDs zur Erzeugung der Hintergrundleuchtdichte als auch die drei LEDs, welche zur Realisierung der Detektionsobjekte eingesetzt wurden, besaßen die gleiche Farbtemperatur von $\text{CCT} = 6170 \text{ K}$. Die Probandeneingabe wurde über ein Keypad realisiert, auf dem die Probanden die Lage des aktuell dargestellten Detektionsobjektes durch Drücken einer korrespondierenden Taste angeben mussten. Der Versuchsablauf und die Komponenten wurden über eine in C# programmierte Software gesteuert. Abbildung 6.3 zeigt schematisch die Komponenten des Laboraufbaus.

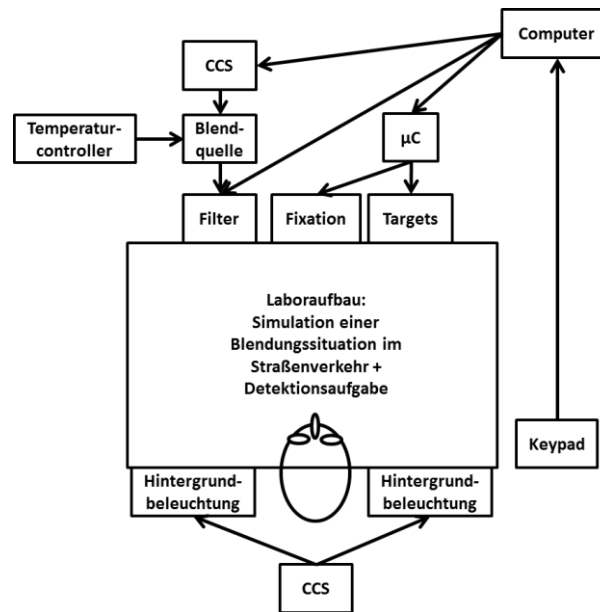


Abbildung 6.3: Komponenten des Laboraufbaus

Die Laboruntersuchung wurde für sieben Wellenlängen λ_{PHB} (im Folgenden Blendwellenlängen genannt) durchgeführt. Die spektrale physiologische Blendung wurde demnach auf der Basis von sieben Stützstellen untersucht. Die sieben Blendwellenlängen sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. Der Wert der jeweiligen Blendwellenlänge beschreibt hierbei die Schwerpunktwellenlänge des spektralen Strahldichteverlaufes der Blendquelle. Wie zuvor beschrieben, bestand die Blendquelle aus einer Konstantspannungsquelle, einer LED und einem LCTF. Zur Kalibrierung der Blendquelle wurde für alle untersuchten Blendwellenlängen die Strahldichte der Blendquelle in Abhängigkeit des LED-Stromes vermessen $L_{e_PHB}(\lambda_{PHB}, I)$. Die Messungen wurden mit einem Strahldichtespektrometer vom Typ Konica Minolta CS 2000 durchgeführt. Das Messgerät ermöglicht eine Messung der Strahldichte mit einer Messfeldgröße von $0,1^\circ$. Somit war es möglich, die Strahldichte im Zentrum der Blendquelle zu messen.

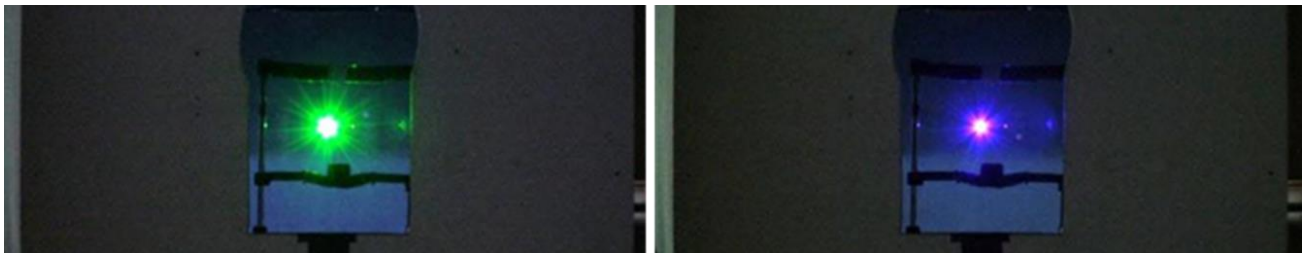


Abbildung 6.4: Blick in den Laboraufbau für zwei unterschiedliche Blendwellenlängen λ_B

Der Laborversuch wurde mit insgesamt sieben Probanden durchgeführt. Sechs Probanden hatten ein Alter zwischen 28 und 31 Jahren. Ein Proband war zum Zeitpunkt der Versuche 41 Jahre alt. Drei der sieben Probanden trugen während der Versuche eine Brille. Jeder der Probanden musste vor dem eigentlichen Versuchsablauf eine Voruntersuchung durchführen. Hierbei wurde ohne Blendung für jeden Probanden individuell die Leuchtdichte der drei Detektionsobjekte gleichmäßig so justiert, dass die Detektionswahrscheinlichkeit knapp unter dem Wert $P = 1$ lag. Während dem eigentlichen Versuchsablauf wurden jedem Probanden die Detektionsobjekte ausschließlich in seiner individuellen Leuchtdichte dargestellt. Der eigentliche Versuchsdurchlauf teilte sich in sieben direkt aufeinanderfolgende Abschnitte, wobei in jedem Abschnitt eine der sieben Blendwellenlängen untersucht wurde. Die Blendwellenlängen wurden hierbei randomisiert auf die sieben Abschnitte verteilt. Für jeden

Abschnitt wurde zunächst die Strahldichte der Blendquelle gesucht, bei der der Proband nicht mehr in der Lage ist, die Detektionsobjekte zu erkennen: $L_{e_PHB}(\lambda_B, P = 0)$. Hierfür wurde die Strahldichte der Blendquelle automatisch schrittweise erhöht, während die Detektionsobjekte randomisiert dargestellt wurden. Die Aufgabe des Probanden war hierbei einen Knopf zu drücken, sobald er nicht mehr in der Lage ist, die Objekte zu erkennen. Die Software hat anschließend den gefundenen Strahldichtewert durch zwölf geteilt. Somit ergeben sich zwölf Strahldichteniveaus, mit denen jeder Proband in einem Abschnitt konfrontiert wurde. Hierbei wurden die Strahldichteniveaus schrittweise vom kleinsten zum größten Wert durchlaufen. Für jedes Strahldichteniveau der Blendquelle wurden 20 Objekte randomisierten nacheinander an einer der drei Objektpositionen dargestellt. Der Proband hatte hierbei die Aufgabe, unter Beibehaltung seiner Fixation auf dem Fixationspunkt die jeweils erkannte Objektposition mit dem Keypad einzugeben. Wird ein Objekt nicht erkannt, so sollte nicht geraten werden und demnach auch keine Eingabe erfolgen. Für jedes Niveau der Strahldichte der Blendquelle ergab sich somit eine Detektionswahrscheinlichkeit von $P = 0/20$ bis $P = 20/20$ mit einer Auflösung von $\Delta P = 1/20 = 0,05$. Für jeden Abschnitt, also für jede Blendwellenlänge und jeden Proband, wurden demnach zwölf Strahldichtewerte inkl. zugehörigen Detektionswahrscheinlichkeiten ermittelt. Zur Auswertung der Daten wurde an jeder dieser wellenlängenabhängigen Verläufe eine psychometrische Funktion (Sigmoid- bzw. S-Funktion) angepasst. Die Funktionsanpassungen wurden unter Zuhilfenahme der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durchgeführt. Auf Basis der angepassten Einzelfunktionen wurden im Anschluss die Strahldichtewerte für eine einheitliche Detektionswahrscheinlichkeit von $P = 0,7$ ermittelt. Die folgende Abbildung 6.5 zeigt den Verlauf der Detektionswahrscheinlichkeiten für einen Probanden und drei der insgesamt sieben Blendwellenlängen. Ebenso ist in Abbildung 6.5 das Ablesen der Strahldichtewerte für die jeweiligen Blendwellenlängen für die Detektionswahrscheinlichkeit $P = 0,7$ anhand von roten Pfeilen dargestellt.

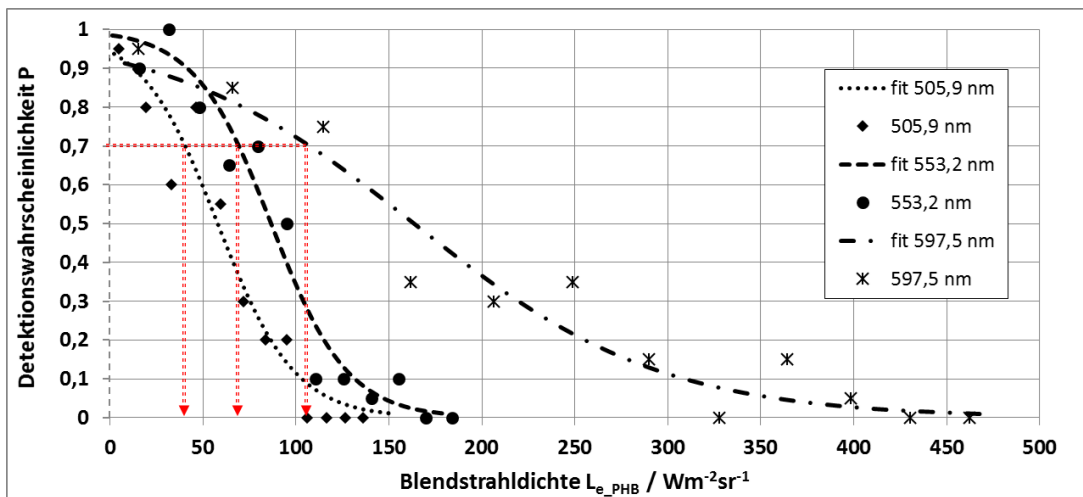


Abbildung 6.5: Detektionswahrscheinlichkeiten eines Probanden für unterschiedliche Wellenlängen

Abbildung 6.5 zeigt, dass sich für unterschiedliche Wellenlängen gänzlich unterschiedliche psychometrische Funktionen ergeben. Es ist klar ersichtlich, dass dieser Proband z.B. für die Blendwellenlänge $\lambda_B = 597,5 \text{ nm}$ deutlich weniger empfindlich ist als für die Blendwellenlänge $\lambda_B = 505,9 \text{ nm}$: Um die Detektionswahrscheinlichkeit auf einen Wert von $P = 0,7$ zu reduzieren, wird für die Blendwellenlänge $\lambda_B = 505,9 \text{ nm}$ weniger als die Hälfte an Strahldichte der Blendquelle L_{e_PHB} benötigt, wie für die Blendwellenlänge $\lambda_B = 597,5 \text{ nm}$.

6.3 Ergebnisse

Für die Berechnung der relativen spektralen Empfindlichkeiten wurden für jeden Probanden und jede Blendwellenlänge die Strahldichten der Blendquelle für eine Detektionswahrscheinlichkeit von $P = 0,7$ anhand der zuvor beschriebenen angepassten Funktionen bestimmt. Um Empfindlichkeitswerte zu berechnen, wurde das Inverse der Einzelwerte gebildet. Anschließend wurden die sich ergebenden Werte auf das Maximum des jeweiligen Probanden normiert. Die so entstandenen normierten spektralen Empfindlichkeitsverläufe der einzelnen Probanden sind in Abbildung 6.6 dargestellt. Zusätzlich sind zu Vergleichszwecken jeweils der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad für das Tagessehen $V(\lambda)$ sowie der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad für das skotopische Nachtsehen $V'(\lambda)$ abgebildet. Die $V'(\lambda)$ Funktion wurde 1951 durch die CIE veröffentlicht [93]. Man geht hierbei von einem 10° Normalbeobachter aus, dessen Adaptation skotopisch, also rein stäbchenbasiert ist. In einem Adaptationsbereich von „*some 1/100 of a cd/m^2 to several cd/m^2* “ [94] geht die CIE von einer Mischadaptation von Stäbchen und Zapfen aus. Dieser Adaptationsbereich wird mesopischer Bereich genannt.

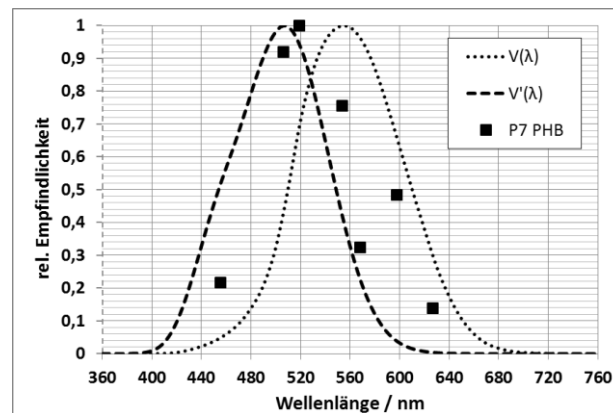
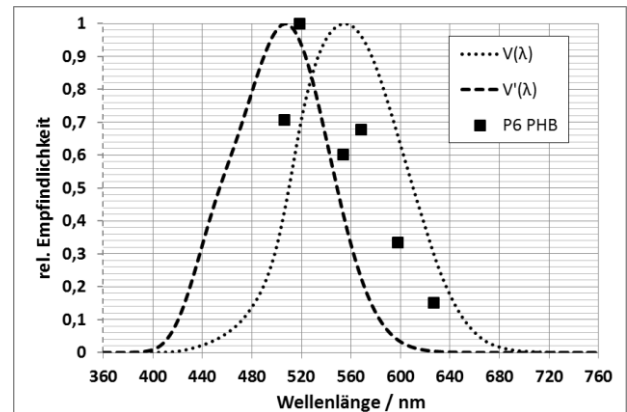
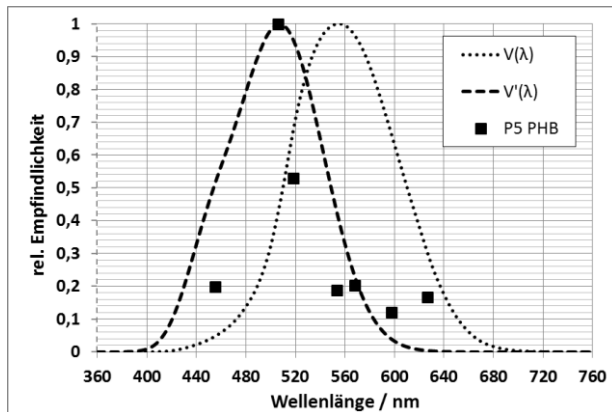
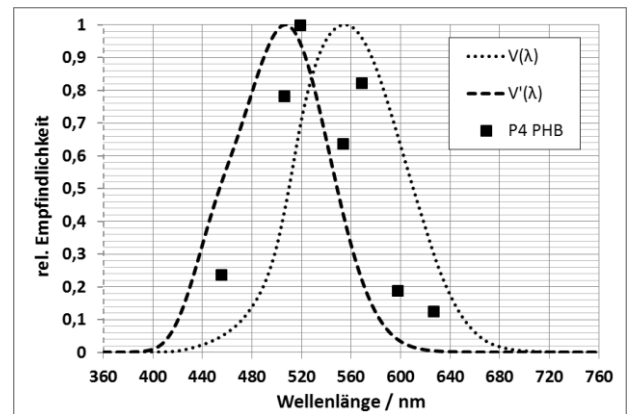
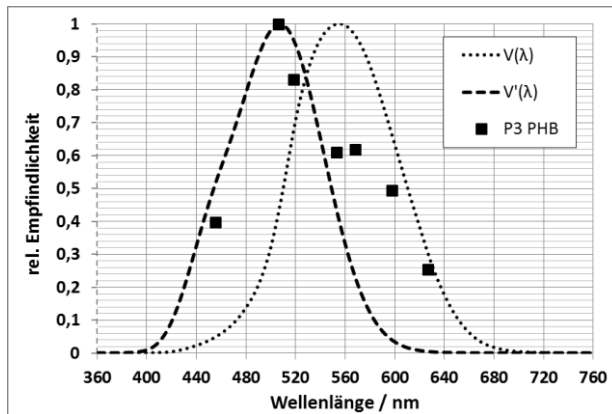
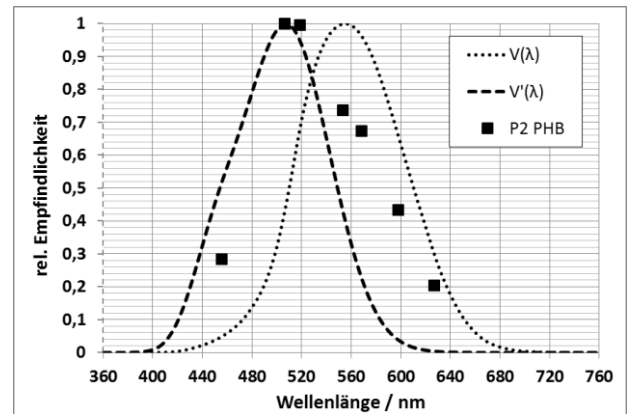
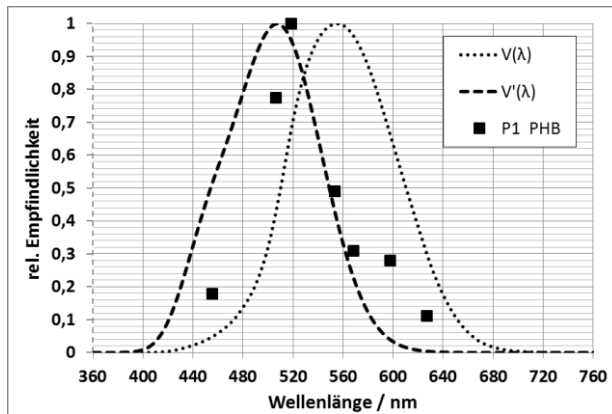


Abbildung 6.6: Spektrale Blendempfindlichkeit der einzelnen Probanden

Abbildung 6.6 zeigt deutlich, dass das Maximum der spektralen physiologischen Blendung bei jedem Probanden bei ca. 510 nm bis 520 nm liegt. Demnach ist das Maximum gegenüber der $V(\lambda)$ Funktion um

35 nm – 45 nm zu kürzeren Wellenlängen hin verschoben. Im Bereich zwischen 550 nm und 600 nm kommt es zu größeren interpersonellen Streuungen. Die folgende Abbildung 6.7 zeigt die mittlere spektrale physiologische Blendempfindlichkeit PHB aller Probanden. Die Fehlerbalken zeigen die, auf das Maximum normierte, einfache Standardabweichung. Zusätzlich zeigt Abbildung 6.7 eine an die PHB -Werte angepasste Funktion $PHB(\lambda)$. Hierbei handelt es sich um eine additive Verknüpfung der $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$ Funktionen (vgl. Formel (6-1)), analog zu dem „Recommended System for Performance Based Mesopic Photometry“ der CIE [95]. Die Funktionsanpassung wurde mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durchgeführt: Die Multiplikatoren a und b wurden so angepasst, dass die quadratischen Differenzen zwischen den sich ergebenden Empfindlichkeiten der angepassten Funktion und den Empfindlichkeiten der sieben Blendwellenlängen minimiert wurden.

$$PHB(\lambda) = a \cdot V(\lambda) + b \cdot V'(\lambda) = 0,43 \cdot V(\lambda) + 0,71 \cdot V'(\lambda) \text{ mit } R^2 = 0,93 \quad (6-1)$$

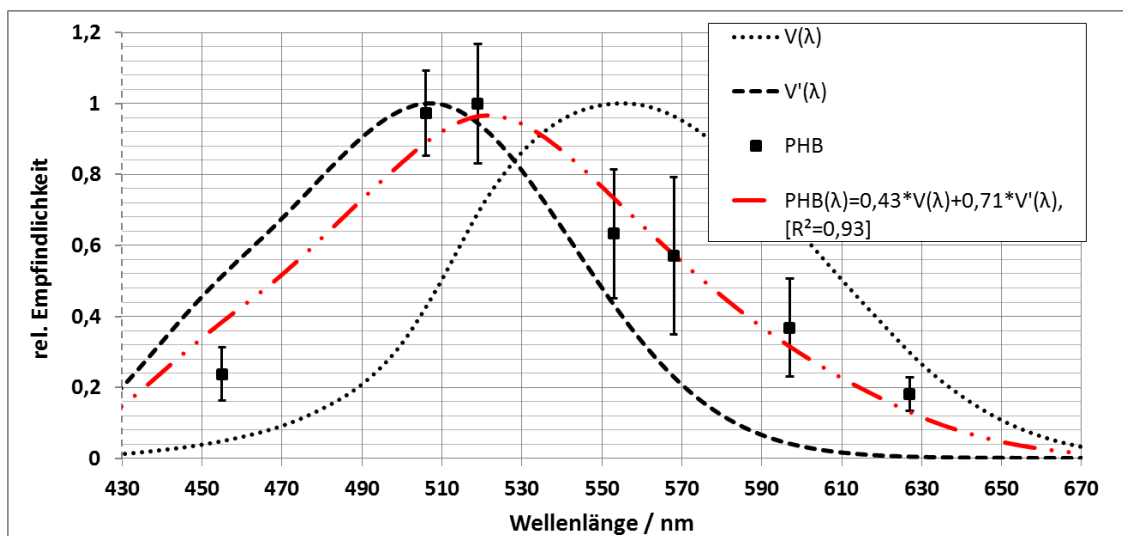


Abbildung 6.7: Spektrale Empfindlichkeit der physiologischen Blendung (PHB)

Die folgende Tabelle 6.1 zeigt die sieben Blendwellenlängen und die zugehörigen Empfindlichkeiten. Ebenso ist die einfache Standardabweichung angegeben. Die Werte entsprechen den Werten in Abbildung 6.7.

Tabelle 6.1: Relative spektrale Empfindlichkeit der physiologischen Blendung

Blendwellenlänge λ_{PHB} / nm	rel. Empfindlichkeit PHB	rel. Standardabweichung
455,1	0,238	0,075
505,9	0,973	0,119
518,5	1,000	0,168
553,2	0,633	0,181
568,2	0,571	0,222
597,5	0,368	0,138
626,6	0,181	0,047

Zur weiteren Analyse der spektralen physiologischen Blendung wird die Funktion $PHB(\lambda)$ zur Gewichtung von fünf typischen Lampenspektren (HAL, HID, LED_1, LED_2, LED_3) eingesetzt. Hierzu werden die fünf Lampenspektren zunächst so gewichtet, dass ihre photometrische Leistung exakt die gleiche ist. Abbildung 6.8 zeigt die Verläufe der radiometrischen Bestrahlungsstärke der fünf Lampenspektren.

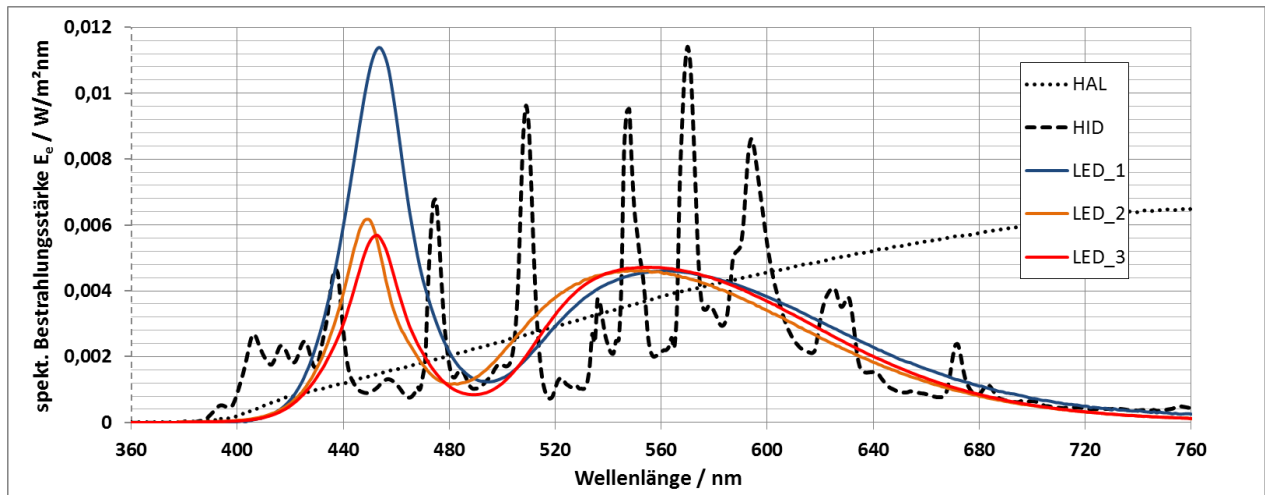


Abbildung 6.8: Lampenspektren mit gleicher photometrischer Leistung

Die fünf dargestellten Lampenspektren besitzen die gleiche photometrische Leistung. Zur Beurteilung der durch sie verursachten physiologischen Blendung werden die fünf Spektren jeweils mit der zuvor beschriebenen Funktion $PHB(\lambda)$ gewichtet. Anschließend wird durch Integration der Blendwert PHB berechnet. Würde $PHB(\lambda)$ der $V(\lambda)$ Funktion entsprechen, dann würde sich für alle Lampenspektren der gleiche Blendwert PHB ergeben.

$$PHB = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E_e(\lambda) \cdot PHB(\lambda) \cdot d\lambda \quad (6-2)$$

$$PHB_{rel} = \frac{PHB}{PHB_{max}} \quad (6-3)$$

In Tabelle 6.2 ist für jedes Lampenspektrum die Farbtemperatur, das S/P- Verhältnis und die relative physiologische Blendung PHB_{rel} (vgl. Gleichungen (6-2)(6-3)) angegeben.

$$\text{S/P - Verhältnis: } S/P = \frac{1699 \cdot \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E_e(\lambda) \cdot V'(\lambda) \cdot d\lambda}{683 \cdot \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (6-4)$$

Tabelle 6.2: Blendung von HAL, HID, LED_1, LED_2 und LED_3 nach $PHB(\lambda)$

Lampenspektren	Farbtemp. CCT / K	S/P	PHB_{rel}
HAL	3160	1,52	0,81
HID	4043	1,61	0,83
LED_1	5013	1,74	0,86
LED_2	5527	1,90	0,90
LED_3	7860	2,24	1,00

Tabelle 6.2 zeigt, dass das verwendete Spektrum LED_3 den höchsten Wert für PHB_{rel} erzielt und demnach im Vergleich zu den anderen Lampenspektren von der $V(\lambda)$ Funktion am deutlichsten fehlengewichtet wird. Die Lampenspektren HAL, HID und das LED-Spektrum mit der niedrigsten Farbtemperatur LED_1 unterscheiden sich kaum hinsichtlich PHB_{rel} . Wie in Abbildung 6.9 ersichtlich ist, steigt der Wert für PHB_{rel} annähernd linear mit der Farbtemperatur an. Dies gilt ebenso für das S/P-Verhältnis.

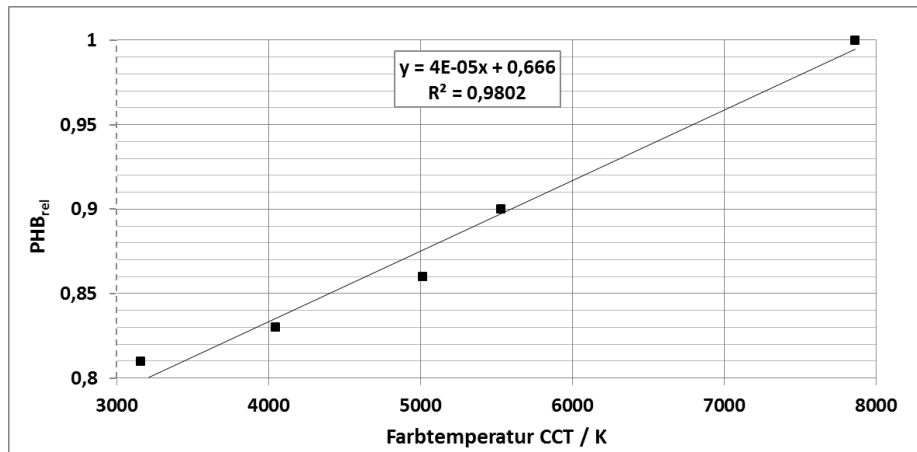


Abbildung 6.9: Relative physiologische Blendung PHB_{rel} und Farbtemperatur CCT

Die Verschiebung der spektralen Empfindlichkeit der physiologischen Blendung in Richtung kleinerer Wellenlängen lässt sich sicher dadurch begründen, dass zum einen durch die periphere Betrachtung und zum anderen durch die mesopische Adaptation eine große Beteiligung der Stäbchen vorliegt. HOLLADAY hat in seiner Arbeit [19] argumentiert, dass die physiologische Blendung durch Streulicht bedingt ist und beschreibt die Streuung der Blendquelle im Auge, ebenso wie STILES [96], anhand der Rayleigh Streuung. Nach Rayleigh ist die Intensität gestreuten Lichtes proportional zu λ^{-4} . Licht niedrigerer Wellenlänge würde demnach im Auge mehr gestreut als das größerer Wellenlänge. Somit sollte für Licht niedrigerer Wellenlänge weniger Strahldichte der Blendquelle nötig sein, um die gleiche Reduzierung der Detektionswahrscheinlichkeit zu erreichen wie mit Licht größerer Wellenlänge. WHITAKER et. al. untersuchten in ihrer Arbeit 1993 [97] das Streulicht bei jungen Menschen, älteren Menschen und Menschen mit Katarakt (Trübung der Augenlinse) in einem Wellenlängenbereich von 460 nm bis 660 nm unter verschiedenen Blendwinkeln. Sie stellen hierbei fest, dass „*wavelength-dependent scatter in normal young, elderly, or cataractous eyes is of little significance*“. Zusätzlich stellen WHITAKER et. al. in ihrer Arbeit fest, dass das Streulicht der älteren Probanden deutlich über dem der jüngeren Probanden und das der Probanden mit Katarakt deutlich über dem der älteren Probanden liegt. Des Weiteren wurde festgestellt, dass bei der jungen und alten Probandengruppe das Streulicht gleichermaßen mit kleiner werdendem Blendwinkel steigt. FRANSSEN und COPPENS gehen noch einen Schritt weiter, sie beschreiben in ihrer Arbeit von 2007 [98] ein Modell, welches Streulicht im Auge anhand von drei Komponenten mit unterschiedlichen Wellenlängenabhängigkeiten beschreibt: Alterskomponente, Basiskomponente und Pigmentkomponente. Die Alterskomponente verursacht Streulicht in allen Wellenlängenbereichen. Die Basiskomponente besitzt ein strenge λ^{-4} Wellenlängenabhängigkeit nach Rayleigh. Die Pigmentkomponente verursacht bei nicht vorhandener perfekter Pigmentierung des Auges Streulicht im roten Wellenlängenbereich. Demnach ergibt sich nach FRANSSEN und COPPENS bei einem typischen Europäer mit relativ geringer Pigmentierung der Augen die Situation, dass sich die Basiskomponente und die Pigmentkomponente gerade aufheben. In der Summe ergibt sich für diese Situation ein wellenlängenneutrales Streuverhalten. FRANSSEN und COPPENS begründen hiermit auch die gefundene Wellenlängenunabhängigkeit von vorhergehenden Untersuchungsergebnisse wie z.B. von der zuvor beschriebenen Untersuchung von WHITAKER et. al.. Da an der hier beschriebenen Laboruntersuchung ausschließlich typische Europäer beteiligt waren, kann demnach davon ausgegangen werden, dass das Streulicht sich wellenlängenunabhängig ausgebildet hat und somit keine wellenlängenabhängige Streulichtintensität einen Einfluss auf den Verlauf der festgestellten relativen spektralen physiologischen Blendung hatte.

NIEDLING et. al. haben in ihren Untersuchungen [99] [100] [101] ebenso die spektrale Empfindlichkeit der physiologischen Blendung untersucht. Zusätzlich untersuchten sie die spektrale Empfindlichkeit der psychologischen Blendung. Die Untersuchungen richteten sich hierbei aber eher an die Gegebenheiten einer Blendung durch ortsfeste Straßenbeleuchtung. So war die Blendquelle nicht wie in der hier vorgestellten Untersuchung links der Sehachse, sondern in einem Blendwinkel von 4° vertikal über der Sehachse positioniert. Das Adaptationsniveau stellten NIEDLING et. al. auf vergleichbare $0,05 \text{ cd/m}^2$ ein. Während des Versuchsablaufes wurden die Probanden mit quasi monochromatischen Reizen gleicher Strahldichte geblendet. Hierbei war die Halbwertsbreite der Reize mit 25 nm deutlich über dem Wert von 7 nm in der hier vorgestellten Untersuchung. Unter Blendung mussten die Probanden bei NIEDLING et. al. einen Knopf drücken, sobald sie die Öffnungsrichtung eines kontinuierlich heller werdenden Landoltrings erkennen konnten. Der Landoltring hatte einen Öffnungswinkel von $0,38^\circ$ und wurde foveal betrachtet. Über den sich für die jeweilige Blendwellenlänge ergebenden Grauwert konnte anschließend eine Blendempfindlichkeit berechnet werden. Die folgende Abbildung 6.10 zeigt die spektrale physiologische Blendempfindlichkeit *PHB* der hier beschriebenen Untersuchung als auch die Ergebnisse von NIEDLING et. al. *PHBNL*.

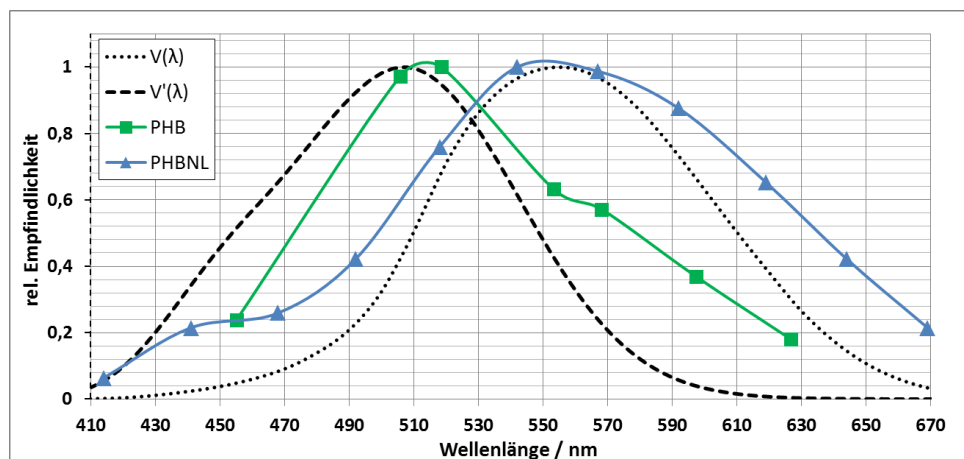


Abbildung 6.10: Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den Ergebnissen von NIEDLING

Abbildung 6.10 zeigt, dass sich die Ergebnisse von NIEDLING et. al. im Vergleich zu den Ergebnissen der hier beschriebenen Untersuchung relativ stark unterscheiden. Beide Untersuchungen sind unter ähnlichen Adaptationsbedingungen durchgeführt worden. In der hier vorgestellten Untersuchung wurde die Strahldichte der Blendquelle variiert. Bei NIEDLING et. al. hingegen wurde die Leuchtdichte des Detektionsobjektes variiert. Der gravierendste Unterschied liegt in der Tatsache, dass NIEDLING seine Probanden angewiesen hat, das Detektionsobjekt foveal zu betrachten. Demnach kann man davon ausgehen, dass hauptsächlich Zapfen an dem Empfindlichkeitsverlauf beteiligt waren. In der hier vorgestellten Untersuchung wurden die Detektionsobjekte peripher in einem Winkel von $2,15^\circ$ betrachtet ($2,15^\circ$ bis $3,15^\circ$ bei Beachtung der Größe der Detektionsobjekte). Die folgende Abbildung 6.11 zeigt die Verteilung der Stäbchen und Zapfen nahe der Fovea nach OSTERBERG [102]. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass im Winkelbereich von $2,15^\circ$ bis $3,15^\circ$ schon sehr viele Stäbchen auf der Netzhaut vertreten sind. Demnach kommt es zu einem Beitrag der Stäbchen, was dazu führt, dass das Maximum in den kurzwelligen Bereich verschoben ist.

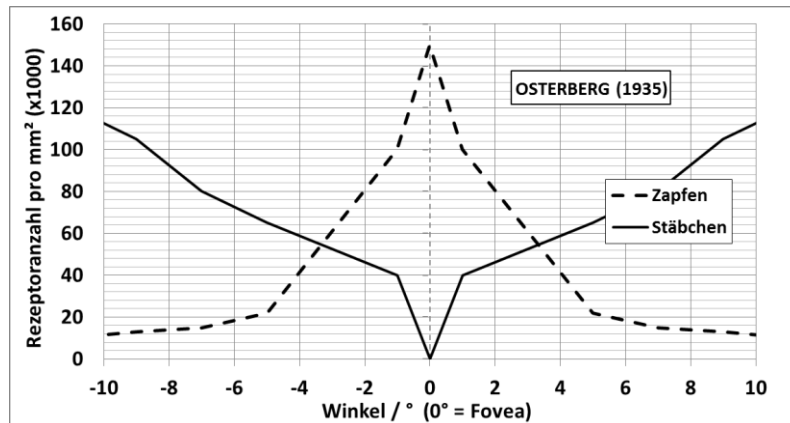


Abbildung 6.11: Rezeptorverteilung nahe der Fovea nach OSTERBERG [102]

Die spektrale Empfindlichkeit der psychologischen Blendung unter mesopischen Bedingungen wurde unter anderem durch BODROGI und WOLF [103] [104], FEKETE et. al. [105] [106] und NIEDLING et. al. [99] [100] untersucht. Wobei alle diese Untersuchungen zu dem Schluss gekommen sind, dass im Vergleich zur spektralen Hellempfindlichkeit für das Tagessehen $V(\lambda)$ das spektrale Verhalten der psychologischen Blendung eine erhöhte Empfindlichkeit im kürzeren Wellenlängenbereich aufweist. In der folgenden Abbildung 6.12 sind die spektralen Verläufe nach FEKETE et. al. und BODROGI et. al. angegeben.

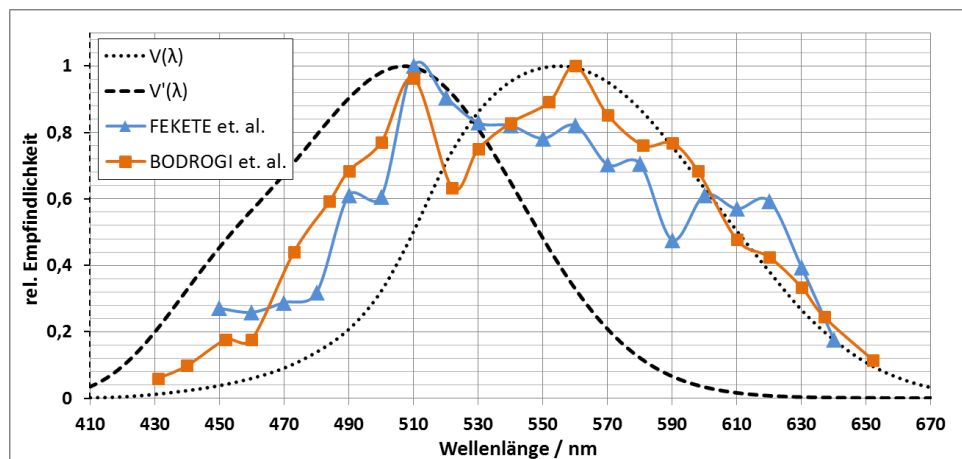


Abbildung 6.12: Psychologische Blendempfindlichkeit nach FEKETE [105] und BODROGI [103]

6.4 Fazit

Die beschriebene Untersuchung zeigt, dass ein erhöhter Blauanteil der Blendquelle zu einer Erhöhung der physiologischen Blendung im peripheren Bereich führt. Ein erhöhter Blauanteil wird hierbei von der $V(\lambda)$ Funktion unterbewertet. Dies ist auf Basis der beschriebenen Literaturrecherche nicht auf wellenlängenabhängige Streueffekte im Auge zurückzuführen und lässt sich demnach vermutlich durch die Rezeptorverteilung im Auge erklären. Diese Ansicht wird unterstützt durch die Tatsache, dass nach der Untersuchung von NIEDLING et. al. eine foveale Betrachtung eines Detektionsobjektes dazu führt, dass die spektrale Empfindlichkeit der physiologischen Blendung stark der $V(\lambda)$ Funktion ähnelt. Diesen Annahmen folgend kann geschlussfolgert werden, dass Blendquellen mit einem hohem Blauanteil auf die periphere Sichtbarkeit von Objekten, wie sie insbesondere im nächtlichen Straßenverkehr relevant ist, einen negativen Einfluss haben. Demnach muss für periphere Sicht bläuliches Streulicht im Auge, also ein

hoher Blauanteil der Blendquellen, vermieden werden, weil das Auge für peripheres Sehen im unteren Wellenlängenbereich empfindlich ist. Ohne Blendung kann ein erhöhter Blauanteil für die eigene Sicht demnach auch nützlich sein. So beschreiben z.B. DERLOFSKE und BULLOUGH [107] [108], dass ein höherer Blauanteil insbesondere peripher einen positiven Einfluss auf die Reaktionszeit hat. VÖLKER schlussfolgert in seiner Arbeit [109], dass im Sinne der Detektion von Objekten „*light sources with a high part of shorter wavelength promote safety*“.

Hinsichtlich idealen Bedingungen für den Fahrer in mesopischen Nachtfahrverhältnissen kann demnach geschlussfolgert werden, dass eine Blendung mit möglichst niedrigem Blauanteil erfolgen sollte. Für die eigene periphere Sicht hingegen ist ein hoher Blauanteil von Vorteil (vgl. Abbildung 6.13). Idealerweise sollten demnach Scheinwerfer in Bereichen, in denen es potentiell zu einer Blendung anderer Verkehrsteilnehmer kommen kann, einen geringen Blauanteil vorweisen. In fast allen anderen Bereichen ist ein erhöhter Blauanteil von Vorteil. Für solch eine Variation des Blauanteils in der Lichtverteilung von Scheinwerfern bietet sich insbesondere blendfreies Fernlicht auf LED-Basis mit zu- und abschaltbaren Segmenten an (vgl. Kapitel 2.2.2.2). Der Blauanteil einer LED kann durch den Leuchtstoff, welcher über der blauen Anregungs-LED vergossen ist, eingestellt werden [13].

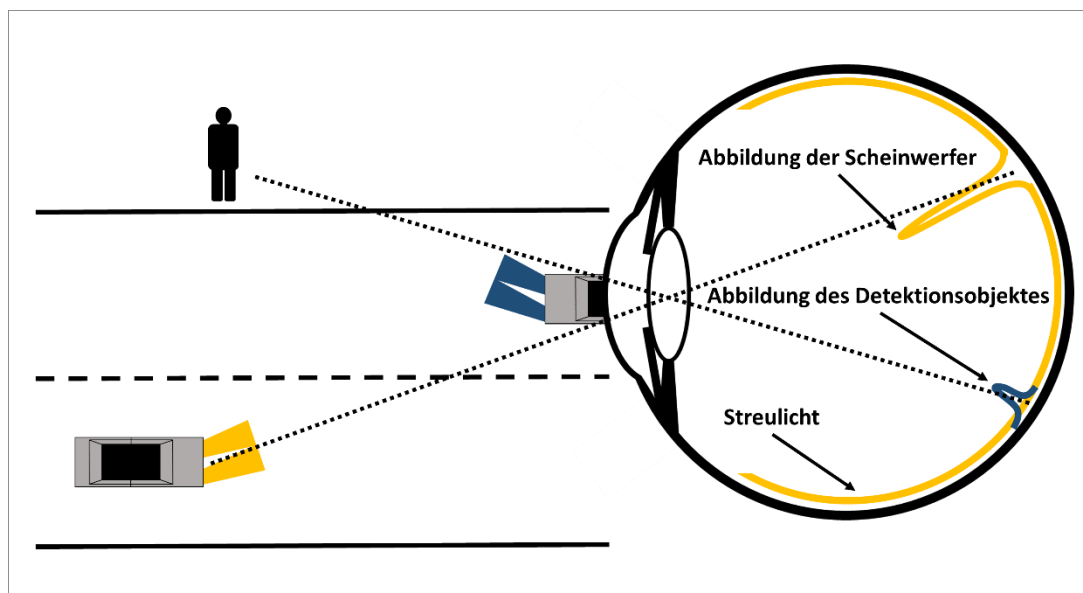


Abbildung 6.13: Streulicht durch Blendung und Detektion im peripheren Netzhautbereich

Die Erkenntnisse dieser Untersuchung initiierten ein seit 2011 laufendes industriefinanziertes Forschungsvorhaben. Das Ziel dieses Vorhabens ist, das spektrale Verhalten von Blendung und Detektion in mesopischen Bedingungen zu untersuchen und somit die beschriebenen Erkenntnisse zu vertiefen.

7 Kritik und Ausblick

Dieses Kapitel gibt eine kritische Übersicht über die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und beschreibt Anregungen für weiterführende Untersuchungen. Generell beschäftigt sich diese Arbeit mit insgesamt vier Themengebieten bzw. Fragestellungen hinsichtlich der von Kraftfahrzeugscheinwerfern ausgehenden Blendung:

1. Wie wird Blendung im Straßenverkehr und wie werden Dunkelheitsfahrten wahrgenommen?
2. Verbessert blendfreies Fernlicht die Detektionsdistanz bei Nachtfahrten, und geht eine eventuelle Verbesserung der Detektionsdistanz mit einer Erhöhung der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer einher?
3. Wie empfindlich reagiert die Blendung auf eine ladungsbedingte Bewegung der Hell-Dunkel-Grenze, und von welchen Parametern ist diese Empfindlichkeit abhängig?
4. In wie weit unterscheidet sich die spektrale physiologische Blendung von der $V(\lambda)$ Funktion, und welchen Einfluss hat ein eventueller Unterschied auf die zu erwartende Blendung von unterschiedlichen Lampenarten?

Zur Klärung der ersten Fragestellung wurde eine Umfrage durchgeführt. Hierbei hat sich herausgestellt, dass der am häufigsten vorkommende Störfaktor bei Dunkelheitsfahren eine Blendung durch andere Fahrzeuge ist (manchmal bis oft). Des Weiteren geben 64 % aller Teilnehmer an, schon einmal in eine durch Blendung verursachte gefährliche Situation geraten zu sein. Hierbei hat, auf Grund einer Blendung durch andere Verkehrsteilnehmer, fast die Hälfte aller Teilnehmer schon einmal den Straßenverlauf falsch eingeschätzt und etwa jeder fünfte Teilnehmer eine Person übersehen oder zu spät erkannt. Vier Teilnehmer geben an, dass sie in einen durch Blendung verursachten Unfall geraten sind, wobei es bei drei der Unfälle zu einem Personenschaden gekommen ist. Die Umfrageergebnisse zeigen demnach, dass Blendung im Straßenverkehr ein ernstzunehmendes Problem darstellt. Hinsichtlich Dunkelheitsfahrten hat sich gezeigt, dass Teilnehmer mit Xenonscheinwerfern weniger gestresst sind als Teilnehmer mit Halogenscheinwerfern. Ebenso hat sich ergeben, dass Teilnehmer mit Xenonscheinwerfern Dunkelheitsfahrten gegenüber positiver eingestellt sind als Teilnehmer mit Halogenscheinwerfern. Problematisch ist hierbei, dass aus den Ergebnissen nicht direkt abgeleitet werden kann, dass Xenonscheinwerfer hier der ausschlaggebende Parameter sind. So könnte es z.B. ebenso sein, dass sich die Xenonfahrer positiver äußern, weil sie evtl. auch das hochwertigere Fahrzeug fahren. Um den Einfluss der Lampenart genauer zu analysieren, wären isolierte Untersuchungen sinnvoll, bei denen dieselben Probanden über einen gewissen Zeitraum in einem realistischen Szenario unterschiedliche Lampenarten fahren. Wichtig ist hierbei, dass alle anderen Parameter konstant gehalten werden. So muss unter anderem das Fahrzeug das gleiche bleiben. Der Eindruck der Probanden kann z.B. über einen Fragebogen abgefragt werden. Alternativ oder zusätzlich könnten auch physiologischen Größen wie z.B. der Hautleitwert, die Pulsfrequenz oder Hirnströme aufgezeichnet werden (vgl. z.B. Arbeiten von Müller [110] [111]). Eine ebensolche Studie wäre auch für die Untersuchung von adaptiven Scheinwerfersystemen, wie z.B. dem blendfreien Fernlicht, sinnvoll.

Die zweite Fragestellung dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Charakterisierung von blendfreiem Fernlicht. Die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Umfrage zeigen, dass sich etwa 84% der Teilnehmer unabhängig von der Lampenart ihres Fahrzeuges eine bessere Sicht bei Dunkelheitsfahrten wünschen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit der konsequenten Weiterentwicklung von Scheinwerfertechnologien. Die Umfrage zeigt aber ebenso, dass Blendung ein ernstzunehmendes Problem im Sinne der allgemeinen

Verkehrssicherheit darstellt. Demnach muss sichergestellt werden, dass neue Scheinwerfersysteme die Blendung im Verkehrsraum nicht erhöhen. Aus diesem Grund wurde ein Feldtest durchgeführt, der den Kompromiss zwischen einer besseren Sicht für den Fahrer und der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer auf der Basis von Serienscheinwerfern untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass blendfreies Fernlicht, im Vergleich zu HID Abblendlicht, keine signifikante Erhöhung der physiologischen und psychologischen Blendung erzeugt. Hinsichtlich der Detektionsdistanz zeigt sich hingegen ein signifikanter Anstieg gegenüber HID Abblendlicht von 32 m. Hervorzuheben ist hierbei, dass sich diese Aussagen ausschließlich auf das getestete Scheinwerfersystem und die gegebenen Versuchsbedingungen beziehen. Das Versuchsdesign zeigte sich insgesamt als äußerst praktikabel, und es wäre sinnvoll, weitere Scheinwerfersysteme hiermit zu testen. Insbesondere blendfreies Fernlicht auf LED Basis sollte hiermit überprüft werden, da es hier im Gegensatz zu blendfreiem Fernlicht auf HID Basis gänzlich unterschiedliche Konzepte gibt (vgl. Kapitel 2.2.2.2). Ein weiterer wichtiger Aspekt, der in weiteren Arbeiten untersucht werden muss, ist die Robustheit und das dynamische Verhalten der Systeme unter realen Bedingungen. Es gibt hierzu zwar schon Arbeiten von ROSLAK [58] und TOTZAUER [42], doch beziehen sich diese auf die Validierung von Versuchsscheinwerfern. Die Frage ist, in wie weit Seriensysteme in der Lage sind, den dynamischen Bedingungen des Straßenverkehrs gerecht zu werden. Der in dieser Arbeit beschriebene Feldtest wurde zwar unter teildynamischen Bedingungen durchgeführt, aber im Straßenverkehr kann es zu noch wesentlich größeren Relativbewegungen und Beschleunigungen kommen, denen die Systeme evtl. nicht folgen können. Kann ein System nicht folgen bzw. ist es zu träge, so kann dies dazu führen, dass die vertikale Hell-Dunkel-Grenze einen anderen Verkehrsteilnehmer kurzfristig schneidet und es so zu einer Blendung kommt.

Zur Klärung der dritten Fragestellung wurde ein teildynamischer Feldtest durchgeführt, in dem Fahrzeuge für unterschiedliche Beladungszustände hinsichtlich ihrer psychologischen Blendung bewertet wurden (falls vorhanden, wurde die automatische Leuchtweitenregelung deaktiviert). Die Ergebnisse des Feldtestes zeigen, dass die aktuell gültige Kopplung einer obligatorischen Leuchtweitenregelung an einen bestimmten Lampenlichtstrom oder an den Lampentyp LED nicht zielführend ist. Wird ein Fahrzeug im zulässigen Rahmen maximal beladen, so ist zu erwarten, dass es unabhängig von der Lampenart und des Lampenlichtstromes zu einer starken Blendung des Gegenverkehrs kommt. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass sich bei gleicher Beladung der unterschiedlichen Fahrzeuge völlig unterschiedliche Nickwinkel der Hell-Dunkel-Grenze ergeben und demnach der Nickwinkel eine aussagekräftigere Größe als der Beladungszustand ist. Zusätzlich zeigt sich, dass ab einem Nickwinkel von 0 % die psychologische Blendung auf und unter die Bewertung „just admissible“ fällt. Hinsichtlich der Lampenarten zeigt sich für unbeladene Fahrzeuge, ebenso wie bei dem Feldtest zur Bestimmung der Blendung und Detektionsdistanz von blendfreiem Fernlicht, dass sich die Blendung von Halogen- und Xenonscheinwerfern nicht signifikant unterscheidet. Kommt es aber zu einem Nickwinkel, der größer als der Grenzwinkel von 0 % ist, so ergibt sich eine signifikant höhere Blendung der Xenonscheinwerfer. Die Ergebnisse der Umfrage haben gezeigt, dass wenn sich die Teilnehmer für eine am meisten blendende Lampenart entscheiden müssen, sich etwa 70 % aller Teilnehmer für Xenon entscheiden. Verknüpft man dieses Umfrageergebnis mit der Erkenntnis aus dem Feldtest, dass von Xenonscheinwerfern ab einem Nickwinkel von 0 % eine signifikant höhere Blendung ausgeht, so kann die folgende Hypothese aufgestellt werden. Im Straßenverkehr wird ein Xenonscheinwerfer als blendender empfunden, da es im dynamischen Verkehrsraum durch z.B. Kuppen oder Dellen in der Fahrbahn gelegentlich dazu kommt, dass andere Verkehrsteilnehmer von Teilen der Lichtverteilung geblendet werden, die unter der Hell-Dunkel-Grenze (Nickwinkel größer 0 %) liegen. Neben dieser Hypothese lassen sich die Ergebnisse des Feldtests auch durchaus in Verbindung setzen mit der Reaktion von Verkehrsteilnehmern auf ein blendfreies Fernlicht, welches fehlkalibriert ist oder zu träge reagiert und somit mit seiner vertikalen Hell-Dunkel-Grenze blendet.

Die vierte Fragestellung dieser Arbeit beschäftigt sich mit dem Unterschied zwischen der spektralen physiologischen Blendempfindlichkeit und der $V(\lambda)$ Funktion. Zur Feststellung dieses Unterschieds wurde in einem Laborexperiment die spektrale physiologische Blendempfindlichkeit unter mesopischen Bedingungen für ein peripher zu detektierendes Objekt bestimmt. Hierbei hat sich herausgestellt, dass die spektrale Blendempfindlichkeit unter diesen Bedingungen, im Vergleich zur $V(\lambda)$ Funktion, um etwa 35 nm zu kürzeren Wellenlängen hin verschoben ist. Dies hat wiederum zur Folge, dass auf Basis der ermittelten spektralen Empfindlichkeit insbesondere eine LED mit einer hohen Farbtemperatur eine größere physiologische Blendung als eine Halogen- oder Xenonlampe erreicht. Die Halogen- und Xenonlampe ergeben den fast gleichen errechneten Blendwert. Dies unterstreicht die im Feldtest zur Bestimmung der Blendung und Detektionsdistanz gewonnene Erkenntnis, dass sich das Abblendlicht von korrekt eingestellten Xenon- und Halogenscheinwerfern hinsichtlich ihrer physiologischen Blendung nicht signifikant unterscheidet. Zur Überprüfung der Laborergebnisse sollte eine weitere Laboruntersuchung unter denselben Versuchsbedingungen (Detektionswinkel, Adaptation) durchgeführt werden. Anstatt der monochromatischen Blendquelle könnte hierbei eine in der Farbtemperatur einstellbare polychromatische Blendquelle (z.B. unterschiedliche LEDs) eingesetzt werden. Validiert wären die Versuchsergebnisse, wenn sich ergibt, dass eine Blendquelle mit einer hohen Farbtemperatur im Vergleich zu einer Blendquelle mit niedriger Farbtemperatur in gleicher Relation zu höheren Schwellenkontrasten führt, wie die ermittelte spektrale Empfindlichkeitsfunktion vorhersagt.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Fischer, „Gesichtsfeldmorphologie des Fahrzeugführers,“ *Sicherheit im Straßenverkehr*, pp. 163-172, 1974.
- [2] H. Wallentowitz und K. Reif, Handbuch Kraftfahrzeugelektronik. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, Wiesbaden: Friedr.Vieweg & Sohn Verlag GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006.
- [3] M. Hamm und W. Huhn, „Voll-LED-Scheinwerfer im Audi R8,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. 10, pp. 894-900, 2008.
- [4] G. Wichert, „Gedanken zur Verbesserung des Kraftfahrzeug-Scheinwerferlichts,“ *Lichttechnik*, p. 589-595, 1970.
- [5] P. Albou, L. Boinet und J. P. Ravier, „Very thin headlamp with laser sources,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2013.
- [6] M. Götz, M. Kleinkes, S. Pietzonka und N. Schiermeister, „Künftige Entwicklungen von LED-Scheinwerfern,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. 9, pp. 620-627, 2009.
- [7] M. Kleinkes, C. Schmidt und F.-J. Kalze, „Nächste Schritte in der Entwicklung von LED-Scheinwerfern,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. 11, pp. 862-867, 2012.
- [8] S. Raphael, Diplomarbeit: Blendungsbewertung von Scheinwerfern - Untersuchung und Bewertung des Einflusses der Beleuchtungsstärke am Auge, der Leuchtdichte und der Größe der leuchtenden Fläche auf das Blendempfinden und das Kontrastempfinden., Technische Universität Ilmenau, 2004.
- [9] ECE - Economic Commission for Europe, Regulation No. 48: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices, Geneva: United Nations, 2013.
- [10] C. Jebas, S. Schellinger, K. Klinger und K. Manz, Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe F: Fahrzeugtechnik, 2008.
- [11] C. Jebas, Dissertation: Physiologische Bewertung aktiver und passiver Lichtsysteme im Automobil, Karlsruher Institut für Technologie, 2012.
- [12] R. Neumann, „Importance of Auto-Levelling to avoid Glare for Road Users,“ *GTB Document No. CE-4819/Rev.1*, 2012.
- [13] C. Bois, P. Bodrogi, T. Q. Khanh und H. Winkler, „White LED Light Characteristics as a Function of Phosphor Particle Size,“ *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, Nr. 5, pp. 131-135, 2012.

-
- [14] J. J. Vos, „Reflections on glare,“ *Lighting Research and Technology*, Nr. 2, pp. 163-176, 2003.
- [15] J. H. Parsons, „Glare, its causes and effects,“ *The Lancet*, Nr. 1, pp. 234-236, 1910.
- [16] CIE - Commission Internationale de l'Éclairage, ILV - International lighting vocabulary, 2011.
- [17] J. J. Vos, „Glare today in historical perspective: Towards a new CIE glare observer and a new glare nomenclature,“ *Proceedings of the CIE 24th Session*, pp. 39-53, 1999.
- [18] H. Moshhammer und M. Kundi, Medizinische Beurteilungsgrundlagen der Passiven Blendung, Institut für Umwelthygiene, ZPH, Medizinische Universität Wien , 2013.
- [19] L. L. Holladay, „The Fundamentals of Glare and Visibility,“ *Journal of the Optical Society of America*, Nr. 4, pp. 271-319, 1926.
- [20] J. H. Sprute, Dissertation: Entwicklung lichttechnischer Kriterien zur Blendungsminimierung von adaptiven Fernlichtsystemen, Technische Universität Darmstadt, 2012.
- [21] H.-J. Schmidt-Clausen, „Die Schwellenleuchtdichteerhöhung als Blendungsbewertungskriterium,“ *Lichttechnik*, 1971.
- [22] W. S. Stiles, „The Effect of Glare on the Brightness Difference Threshold,“ *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, pp. 322-351, 1929.
- [23] J. J. Vos und T. J. T. P. van den Berg, „Report on Disability Glare,“ *CIE Collection 1999, CIE 135/1 - 1999*, 1999.
- [24] CIE - Commission Internationale de l'Éclairage, „CIE equations for disability glare,“ *CIE TC 1-50, Wien*, 2002.
- [25] J. B. De Boer, „Visual perception in road traffic and the field of vision of the motorist,“ *Public Lighting*, pp. 11-96, 1967.
- [26] A. W. Gellatly und D. J. Weintraub, Report No. UMTRI-90-20: User Reconfigurations of the De Boer Rating Scale for Discomfort Glare, The University of Michigan Transportation Research Institute, 1990.
- [27] ECE - Economic Commission for Europe, Regulation No. 123: Uniform provisions concerning the approval of adaptive front-lighting systems (AFS) for motor vehicles, Geneva: United Nations, 2013.
- [28] B. Wördenweber, J. Wallaschek, P. Boyce und D. D. Hoffmann, Automotive Lighting and Human Vision, Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [29] R. Hying, A. Nauen, T. Reiners, S. Haneder und T. Dobbertin, „Laser Activated Remote Phosphor – the way to ultrahigh luminance in headlamps,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2013.

-
- [30] Pressemeldung BMW, „BMW Laserlicht geht in Serie. Der BMW i8 ist das erste Serienfahrzeug mit der innovativen Lichttechnologie,“ 2014.
- [31] M. Dworzak, „OLED as automotive light source,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2013.
- [32] T. Jobst, L. Küpper und G. Lüttgens, „OLED for automotive signalling applications,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2013.
- [33] H. Brachat, DAT-Report 2013, München: Springer Fachmedien, 2013.
- [34] L. Menzel, T. Murphy und S. Herold, „25W HID – best choice for energy efficient and cost-effective headlights with superior performance,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2011.
- [35] M. Kiesel, „Performance Benchmark Investigation of the new D5S (25 W) BiXenon System,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2011.
- [36] M. Hamm, „LED-Abblendlicht mit 77 % Energieeinsparung,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. 1, pp. 142-147, 2012.
- [37] S. Berlitz, M. Hamm und C. Funk, „Matrix-LED-Scheinwerfer,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. 3, pp. 10-15, 2014.
- [38] R. Lachmayer, M. Götz, M. Kleinkes und W. Pohlmann, „LED-Technik im Scheinwerfer, neue Möglichkeiten mit Leuchtdioden,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. 11, pp. 956-961, 2006.
- [39] B. Dreier und E.-O. Rosenhahn, „Camera Controlled Adaptive Cut-off and Adaptive Partial High,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2009.
- [40] C. Schmidt, F.-J. Kalze und T. Irmscher, „Illumination Strategies for Dynamic Headlamp Functions like Adaptive and Vertical Cut-Off-Line,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2009.
- [41] J. H. Sprute, N. Haferkemper und T. Q. Khanh, „Fernlichtnutzung: Fehlbedienung und Risikokompensation durch Autofahrer – Potenziale für Fernlichtassistenzsysteme,“ *VKU - Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, Nr. 2, 2010.
- [42] A. Totzauer, Dissertation: Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht, Technische Universität Darmstadt, 2012.
- [43] D. J. Leiner, „Too Fast, Too Straight, Too Weird: Post Hoc Identification of Meaningless Data in Internet Surveys,“ *SSRN Journal*, 2013.
- [44] ADAC - Allgemeine Deutsche Automobil-Club, „Entwicklungen der Fahrleistung,“ *Statistiken - Rahmenbedingungen*, 2012.

-
- [45] S. Söllner, J. H. Sprute, D. Polin und T. Q. Khanh, „Field Study: Driver Data on Visual Topics,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2011.
- [46] B. Zydek, C. Schiller, M. Wagner, D. Polin und T. Q. Khanh, „Performance Evaluation of Vehicles with Adaptive Headlamp Systems,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2013.
- [47] B. Zydek, C. Schiller, D. Polin und T. Q. Khanh, „Bewertung von Scheinwerfern mit blendfreiem Fernlicht,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. 6, 2014.
- [48] H.-J. Schmidt-Clausen, „Zur Blendungsbegrenzung von Scheinwerfern für das Abblendlicht,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. 5, pp. 235-243, 1985.
- [49] J. H. Sprute, S. Söllner, N. Haferkemper, C. Schiller, B. Zydek und T. Q. Khanh, „Dynamic Glare Assessment – Defining Undue Glare in Night-time Driving,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2011.
- [50] B. Zydek, Studienarbeit: Entwicklung eines Freiversuchstandes zur dynamischen Messung der Blendung durch Fernlichtassistenzsysteme, Technische Universität Darmstadt, 2009.
- [51] J. B. de Boer und H.-J. Schmidt-Clausen, „Über die zulässige Blendung in der Kraftfahrzeugbeleuchtung,“ *CIE – Commission Internationale de l’Éclairage, XVII Session, Barcelona*, 1971.
- [52] B. Hummel, Dissertation: Blendfreies LED-Fernlicht, Universität Karlsruhe, 2009.
- [53] A. Totzauer und T. Q. Khanh, „Aktuelle Blendungsforschung - Dynamische Blendung, Schleierleuchtdichte, Blendbeleuchtungsstärke,“ *LICHT*, Nr. 10, pp. 70-77, 2012.
- [54] C. Windhoff, Diplomarbeit: Akzeptanzuntersuchung von blendfreiem Fernlicht im Rahmen einer Probandenstudie, Karlsruher Institut für Technologie, 2012.
- [55] M. Böhm und J. Locher, „A Field Approach for Assessing Discomfort Glare from Automobile Headlamps,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2007.
- [56] M. Böhm, F. Kley und S. Kalthoff, „Improving Detection Distances by an Adaptive Cut-Off Line System,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2007.
- [57] J. Locher und S. Völker, „The influence of vehicle beam patterns on safety and acceptance,“ *SAE 2004 World Congress & Exhibition*, 2004.
- [58] J. Roslak, Dissertation: Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums, Universität Paderborn, 2005.
- [59] T. D. Schneider, Dissertation: Markierungslicht - Eine Scheinwerferlichtverteilung zur Aufmerksamkeitssteuerung und Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern, Technische Universität Darmstadt, 2011.

-
- [60] A. Göller und A. Holtmann, Ein Jahrhundert Luftfahrtgeschichte zwischen Tradition, Forschung und Landschaftspflege. Der August-Euler-Flugplatz in Darmstadt-Griesheim, Darmstadt: WBG - Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2008.
- [61] B. Zydek, N. Haferkemper und T. Q. Khanh, „Klettwitz Levelling Test: Analysis of Photometric Data and Comprehension,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2013.
- [62] ECE - Economic Commission for Europe, Regulation No. 112: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps emitting an asymmetrical passing-beam or a driving-beam or both and equipped with filament lamps and/or light-emitting diode (LED) modules, Geneva: United Nations, 2013.
- [63] ECE - Economic Commission for Europe, Regulation No. 98: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps equipped with gas-discharge light sources, Geneva: United Nations, 2012.
- [64] G. Helmers und K. Rumar, „High beam intensity and obstacle visibility,“ *Lighting Research and Technology*, Nr. 1, pp. 35-42, 1975.
- [65] „Adaptive Main Beam: Proposals for Amendments to Regulations 48 and 123,“ *Informal Document No. GRE-64-01, 64th GRE, 4-7 October 2010*.
- [66] ECE - Economic Commission for Europe, Addendum 47: Regulation No. 48, Revision 9 – Amendment 2, Geneva: United Nations, 2013.
- [67] S. Weber, „A new efficient, compact vehicular illumination system using high-power semiconductor laser diodes,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2013.
- [68] S. Michenfelder und C. Neumann, „Entwicklung eines Projektor-basierten Forschungsscheinwerfers zur Erprobung neuartiger Lichtverteilungen,“ *LICHT 2012, Tagungsband der 20. Gemeinschaftstagung*, 2012.
- [69] S. Michenfelder und C. Neumann, „Pixel Lighting – An Automotive Lighting Research Head Lamp,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2013.
- [70] S. Michenfelder und C. Neumann, „Projektorbasiertes automobiles Pixellicht,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. 11, pp. 922-927, 2013.
- [71] S. Michenfelder, M. Neumeyer und C. Neumann, „Konvertierungsalgorithmus für automobilen Forschungsscheinwerfer,“ *Lux junior 2013*, 2013.
- [72] H. W. Bodmann, „Zur Frage einer allgemeingültigen Hellempfindungsskala,“ *Lichttechnik*, Nr. 1, pp. 19-21, 1961.
- [73] H. W. Bodmann und E. A. Voit, „Versuche zur Beschreibung der Hellempfindung,“ *Lichttechnik*, Nr. 8, p. 394-400, 1962.

-
- [74] S. Hecht, „The visual discrimination of intensity and the Weber-Fechner Law,“ *The Journal of General Physiology*, p. 235–267, 1924.
- [75] M. Spering und T. Schmidt, *Allgemeine Psychologie 1 kompakt: Wahrnehmung, Aufmerksamkeit, Denken, Sprache*, BELTZ, 2012.
- [76] S. Otto, *Magisterarbeit: Vergleichende Simulation adaptiver, psychometrischer Verfahren zur Schätzung von Wahrnehmungsschwellen*, Technische Universität Berlin, 2008.
- [77] A. B. Watson und J. I. Yellott, „A unified formula for light-adapted pupil size,“ *Journal of Vision*, Nr. 10, pp. 1-16, 2012.
- [78] K. I. Naka und W. A. H. Rushton, „S-potentials from luminosity units in the retina of fish (Cyprinidae),“ *Journal of Physiology*, Bd. 185, Nr. 3, pp. 587-599, 1966.
- [79] M. Sivak, C. J. Simmons und M. J. Flannagan, Report No. UMTRI-88-41: Effect of Headlamp Area on Discomfort Glare, The University of Michigan Transportation Research Institute, 1988.
- [80] A. Freiding, *Dissertation: Untersuchung zur spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges im mesopischen Bereich*, Technische Universität Darmstadt, 2010.
- [81] P. Bodrogi, Z. Vas, N. Haferkemper, G. Várady, C. Schiller, T. Q. Khanh und J. Schanda, „Effect of chromatic mechanisms on the detection of mesopic incremental targets at different eccentricities,“ *Ophthalmic and Physiological Optics*, Nr. 30, pp. 85-94, 2010.
- [82] B. Zydek, P. Bodrogi, T. Q. Khanh und N. Haferkemper, „A new concept of disability glare under traffic lighting conditions: experimental set-up, results and analysis of spectral sensitivity,“ *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2011.
- [83] T. Q. Khanh und P. Bodrogi, „Latest results of mesopic research under night time driving conditions: Glare, detection and brightness,“ *Automotive Lighting Conference, Prague*, 2012.
- [84] U. Carraro, *Dissertation: Die Adaptationsleuchtdichte bei inhomogenen Leuchtdichtefeldern unter besonderer Berücksichtigung einer dynamischen Sehaufgabe*, Technische Universität Ilmenau , 1984.
- [85] ECE - Economic Commission for Europe, Regulation No. 8: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps emission an asymmetrical passing beam or a driving beam or boh and equipped with halogen filament lamps (H1, H2, H3, HB3, HB4, H7, H8, H9, HIR1, HIR2 and/or H11), Geneva: United Nations, 2002.
- [86] CIE - Commission Internationale de l'Éclairage, „Principales Décisions, Sixième Session,“ *Recueil des Travaux et Compte Rendu de Séances, Cambridge, University Press*, pp. 67-70, Genève, 1924.
- [87] K. S. Gibson und E. P. T. Tyndall, „Visibility of radiant energy,“ *Scientific Papers of the Bureau of Standards*, p. 131–191, 1923.

-
- [88] T. Q. Khanh, „85 Jahre $V(\lambda)$ –Lichttechnik: Entstehung, Wesen der Wahrnehmung, Defizite und neue Aspekte für eine wahrnehmungsgerechte Lichttechnik,“ *Licht*, Nr. 7, 2009.
- [89] T. Q. Khanh, „ $V(\lambda)$ –Lichttechnik: Entstehung, Wesen der Wahrnehmung, Defizite und neue Aspekte für eine wahrnehmungsgerechte Lichttechnik. Eine Publikation zum 100jährigen Jubiläum der CIE (1913-2013),“ *Handbuch für Beleuchtung*, 2013.
- [90] M. Viikari, M. Eloholma und L. Halonen, „80 YEARS OF $V(\lambda)$ USE: A REVIEW,“ *Light & Engineering*, Nr. 5, pp. 24-36, 2005.
- [91] J. Schanda, „Brightness description using different metrics,“ *CIE Central Bureau, Vienna and Dept. Image Processing and Neurocomputers, University Veszprém*, 1995.
- [92] S. Schäfer, Dissertation: Rezeptororientierte Charakterisierung breitbandiger Spektren als Basis einer mesopischen Hellempfindung, Technische universität Berlin, 2012.
- [93] CIE - Commission Internationale de l'Éclairage, Proceedings (1951), Vol. 1, Sec 4; Vol 3, p. 37, Bureau Central de la CIE, Paris, 1951.
- [94] CIE - Commission Internationale de l'Éclairage, „Mesopic Photometry: History, Special Problems, and Practical Solutions CIE 81,“ *CIE 81*, 1989.
- [95] CIE - Commission Internationale de l'Éclairage, „Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance,“ *CIE 191-2010*, 2010.
- [96] W. S. Stiles, „The scattering theory of the effect of glare on the brightness difference threshold,“ *Proceedings of the Royal Society of London. Series B*, 1929.
- [97] D. Whitaker, R. Steen und D. B. Elliot, „Light Scatter in the Normal Young, Elderly, and Cataractous Eye Demonstrates Little Wavelength Dependency,“ *Optometry and Vision Science*, Nr. 11, 1993.
- [98] L. Franssen und J. E. Coppens, Dissertation: Straylight at the retina: scattered papers, Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 2007.
- [99] M. Niedling, „Einfluss der spektralen Zusammensetzung einer Lichtquelle auf die Blendung unter mesopischen Bedingungen,“ *LICHT 20. Gemeinschaftstagung*, pp. 484-487, 2012.
- [100] M. Niedling, D. Kierdorf und S. Völker, „Influence of a Glare Source Spectrum on Discomfort and Disability Glare under Mesopic Conditions,“ *Proceedings of CIE Centenary Conference „Towards a New Century of Light“*, pp. 340-348, 2013.
- [101] M. Niedling und S. Völker, „Spectral power distribution and glare,“ *LUX Europa Tagung*, 2013.
- [102] G. Osterberg, „Topography of the Layer of Rods and Cones in the Human Retina,“ *Acta Ophthalmologica, Supplement*, Nr. 6, pp. 1-103, 1935.

-
- [103] P. Bodrogi, N. Wolf und T. Q. Khanh, „Discomfort glare under automotive conditions – spectral behavior and mechanisms,” *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2011.
- [104] N. Wolf, Diplomarbeit: Aufbau und Automatisierung eines Messplatzes zur Bestimmung der spektralen Blendwirkung von optischer Strahlung, Technische Universität Darmstadt, 2010.
- [105] J. Fekete, F. Horváth, C. Sik-Lányi, J. Schanda, A. Szalmás und G. Várady, „Spectral dependence of visibility and glare,” *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2005.
- [106] J. Fekete, C. Sik-Lányi und J. Schanda, „Spectral discomfort glare sensitivity investigations,” *Ophthalmic and Physiological Optics*, pp. 182-187, 2010.
- [107] J. v. Derlofske und J. D. Bullough, „Spectral Effects of High-Intensity Discharge Automotive Forward Lighting on Visual Performance,” *SAE - Society of Automotive Engineers Special Publications*, pp. 83-90, 2003.
- [108] J. v. Derlofske, J. D. Bullough und J. Watkinson, „Spectral Effects of LED Forward Lighting,” *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2005.
- [109] S. Völker, „Do light sources with a high part of shorter wavelength promote safety?,” *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2007.
- [110] N. Müller und P. Bodrogi, „Modelling of the perceived complexity of road environment in night time driving,” *VISION Conference*, 2012.
- [111] N. Müller und T. Q. Khanh, „Discomfort glare and stress as a question of lighting geometry and radiance,” *ISAL - International Symposium on Automotive Lighting*, 2013.

Anhang

Onlinefragebogen



0% ausgefüllt



Sehr geehrte Teilnehmerin,
sehr geehrter Teilnehmer,

das Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt forscht intensiv am Thema "Blendung im Straßenverkehr". Zu diesem Zweck wurde der vorliegende Fragebogen entwickelt. Er dient der Feststellung und Charakterisierung der Blendung, wie sie im Straßenverkehr auftritt.

Vielen Dank für Ihre Teilnahme.

Mit freundlichen Grüßen,

Bastian Zydek

Dipl.-Ing. Bastian Zydek
Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Lichttechnik
Hochschulstr. 4a
D-64289 Darmstadt

Weiter

[Bastian Zydek](#), [Fachgebiet Lichttechnik](#), [Technische Universität Darmstadt](#) - 2013

1. Geben Sie bitte Ihr Alter in das nachfolgende Feld ein [A001]

Bitte in vollen Jahren angeben, z.B. 32.

 Jahre

2. Bitte wählen Sie Ihr Geschlecht aus [A002]

3. In welchem Land sind Sie geboren? [A005]

4. Benötigen Sie eine Sehhilfe zum Führen eines Kraftfahrzeuges? [A003]

☐

Ja

☐

Nein

5. Seit wann besitzen Sie Ihren Führerschein? [A004]

Bitte eine Jahreszahl angeben z. B. 1956

Weiter

1. In welchem Land fahren Sie hauptsächlich? [A113]

[Bitte auswählen] ▼

2. Wie viele Kilometer fahren Sie ca. pro Jahr? [A101]

- ☐ 0 – 10000 km
 ☐ 10001 – 20000 km
 ☐ 20001 – 30000 km
 ☐ mehr als 30000 km

3. Wie oft fahren Sie in Dunkelheit? [A103]

☒ nie
never
 ☐ selten
rarely
 ☐ manchmal
sometimes
 ☐ oft
often
 ☐ immer
always

4. Wo fahren Sie am häufigsten bei Dunkelheit? [A104]

Bitte sortieren Sie die folgenden Straßentypen absteigend. Hierfür ziehen Sie die rechteckigen Kästchen mit der Maus zu den entsprechenden Zahlenfeldern. Das Zahlenfeld 1 ist mit dem Straßentyp zu belegen, welchen Sie am häufigsten befahren.

Autobahn

Landstraße

Stadt

1

2

3

5. Fahren Sie gerne in Dunkelheit? [A105]

☐

Ja

☐

Nein

6. Wünschen Sie sich eine bessere Sicht bei Dunkelheitsfahrten? [A106]

☐

Ja

☐

Nein

7. Wie empfinden Sie den Streß bei Dunkelheitsfahrten im Vergleich zu Tagfahrten? [A107]

☐

Geringer

☐

Genauso

☐

Doppelt

☐

Dreifach

☐

Vierfach

☐

Fünffach

☐

Mehr als
fünffach

8. Bei Fahrten in der Dunkelheit: Wie häufig treten die folgenden Punkte bei Ihnen auf? [A114]

Müdigkeit	<input checked="" type="radio"/>	nie never	selten rarely	manchmal sometimes	oft often	immer always
Schlechte Sicht	<input checked="" type="radio"/>	nie never	selten rarely	manchmal sometimes	oft often	immer always
Blendung durch andere Fahrzeuge	<input checked="" type="radio"/>	nie never	selten rarely	manchmal sometimes	oft often	immer always
Blendung durch Straßenbeleuchtung	<input checked="" type="radio"/>	nie never	selten rarely	manchmal sometimes	oft often	immer always

Weiter

[Bastian Zydek](#), [Fachgebiet Lichttechnik](#), [Technische Universität Darmstadt](#) - 2013

1. Welches Fahrzeug fahren Sie hauptsächlich? [A201]

☐
PKW

☐
LKW

☐
Motorrad

2. Welchen Lampentyp besitzt Ihr Fahrzeug? [A202]

☐
Halogen

☐
Xenon

☐
LED

☐
Nicht sicher

3. Inwieweit sind Sie zufrieden mit Ihrem Lampentyp? [A208]

☒ gar nicht
not at all

☐ wenig
little

☐ mittelmäßig
moderate

☐ überwiegend
predominant

☐ völlig
complete

4. Wie oft lassen Sie Ihre Scheinwerfer einstellen? [A207]

☐ Mindestens einmal im Jahr

☐ Alle zwei Jahre

☐ Weniger als alle zwei Jahre

☐ Noch nie

☐ Nicht sicher

5. Besitzt Ihr Fahrzeug eines oder mehrere der folgenden Lichtassistenzsysteme? [A203]

Mehrfachnennungen möglich!

- ☐ Abbiegelicht: Meist realisiert durch Zusatzleuchte oder Nebellicht, welches beim Abbiegevorgang in die Zielstraße leuchtet
- ☐ Kurvenlicht: Licht schwenkt während der Kurvenfahrt in den Kurvenradius
- ☐ AFS: Verschiedene Abblendlichtverteilungen wie z. B. Landstraßenlicht, Schlechtwetterlicht, Autobahnlicht
- ☐ Fernlichtassistent: System schaltet automatisch zwischen Fernlicht und Abblendlicht
- ☐ Gleitende Leuchtweite: Die Leuchtweite des Abblendlichtes wird dem vorausfahrenden und entgegenkommenden Verkehr angepasst
- ☐ Blendfreies Fernlicht: System fährt mit Fernlicht und blendet den Gegenverkehr automatisch aus
- ☐ Kein Lichtassistenzsystem
- ☐ Nicht sicher

6. Inwieweit sind Sie mit Ihrem Lichtassistenzsystem zufrieden? [A209]



7. Welchen Aufpreis würden Sie für Ihr Fahrzeug bezahlen, um eine deutlich verbesserte Sicht bei Nachtfahrten zu erhalten? [A206]

- ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
- Nichts 100 € 200 € 300 € 400 € 500 € 1000 € 1500 € 2000 € > 2000 €

Weiter

[Bastian Zydek](#), [Fachgebiet Lichttechnik](#), [Technische Universität Darmstadt](#) - 2013

1. Wie häufig sind Sie generell im Straßenverkehr als Fahrer geblendet? [A333]

☒ nie
never
 ☐ selten
rarely
 ☐ manchmal
sometimes
 ☐ oft
often
 ☐ immer
always

2. Wenn Sie durch andere Fahrzeuge geblendet werden: Wie häufig treten die folgenden Punkte bei Ihnen auf? [A322]

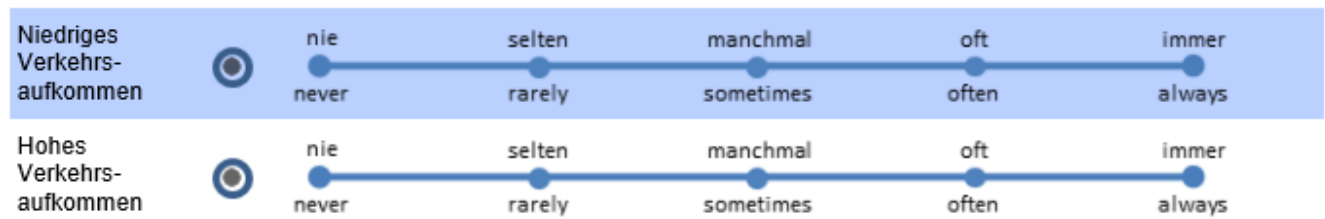
Ermüdung	<input checked="" type="radio"/> nie never <input type="radio"/> selten rarely <input type="radio"/> manchmal sometimes <input type="radio"/> oft often <input type="radio"/> immer always
Ablenkung vom Straßenverkehr	<input type="radio"/> nie never <input type="radio"/> selten rarely <input type="radio"/> manchmal sometimes <input type="radio"/> oft often <input type="radio"/> immer always
Unwohlsein	<input checked="" type="radio"/> nie never <input type="radio"/> selten rarely <input type="radio"/> manchmal sometimes <input type="radio"/> oft often <input type="radio"/> immer always
Eingeschränkte Sicht	<input type="radio"/> nie never <input type="radio"/> selten rarely <input type="radio"/> manchmal sometimes <input type="radio"/> oft often <input type="radio"/> immer always

3. Welchen Witterungstyp assoziieren Sie am ehesten mit Blendung? [A332]

Bitte sortieren Sie den Witterungstyp absteigend, beginnend mit Witterungstyp den sie am ehesten mit Blendung assoziieren. Hierfür ziehen Sie die rechteckigen Kästchen mit der Maus in die entsprechenden Zahlenfelder.

Trockene Fahrbahn	Kein Regen aber nasse Fahrbahn	1
Regen und nasse Fahrbahn	Schneefall und nasse Fahrbahn	2
Schneefall, schneebedeckte Fahrbahn		3
		4
		5

4. Wie häufig fühlen Sie sich unter den folgenden Verkehrsbedingungen geblendet? [A329]



5. Wie häufig fühlen Sie sich durch entgegenkommenden oder Ihnen folgenden Verkehr geblendet? [A323]



6. Wie häufig fühlen Sie sich unter den folgenden Bedingungen durch GEGENVERKEHR geblendet? [A324]



7. Wie häufig fühlen Sie sich unter den folgenden Bedingungen durch Ihnen FOLGENDEN VERKEHR geblendet? [A331]

Innerorts	<input checked="" type="radio"/>	nie never	selten rarely	manchmal sometimes	oft often	immer always
Landstraße	<input checked="" type="radio"/>	nie never	selten rarely	manchmal sometimes	oft often	immer always
Autobahn	<input checked="" type="radio"/>	nie never	selten rarely	manchmal sometimes	oft often	immer always

8. Welchen Lampentyp assoziieren Sie am ehesten mit Blendung? [A304]

Bitte sortieren Sie die Lampentypen absteigend vom Lampentyp den sie am ehesten mit Blendung assoziieren zum Lampentyp, den sie am wenigsten mit Blendung assoziieren. Hierfür ziehen Sie die rechteckigen Kästchen mit der Maus zu den entsprechenden Zahlenfeldern. Falls Sie keine der angegebenen Typen kennen, dann fahren Sie bitte mit der nächsten Frage fort.


Halogen	Xenon	1
		2
LED (Leuchtdiode)		3

9. Was sagt Ihre Erfahrung im Straßenverkehr: Wie verhält sich ein hochmoderner Scheinwerfer hinsichtlich Blendung von anderen Verkehrsteilnehmern? [A319]

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gleichbleibende Blendung anderer Verkehrsteilnehmer	Erhöhung der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer	Verringerung der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer

Weiter

1. Wie häufig sind Sie durch Blendung in eine gefährliche Situation geraten? [A310]



A horizontal line with five points. Above the line are the German words: nie, selten, manchmal, oft, immer. Below the line are the English words: never, rarely, sometimes, often, always. The first point (nie/never) is selected with a radio button.

2. Falls Sie in eine gefährliche Situation geraten sind: Welche Art von Situation hat sich ergeben? [A312]

Eine Mehrfachauswahl ist möglich. Bitte nur ausfüllen, wenn Sie durch Blendung in eine gefährliche Situation geraten sind.

- ☐ Person übersehen / spät erkannt
- ☒ Fahrradfahrer übersehen / spät erkannt
- ☐ Fahrzeug übersehen / spät erkannt
- ☒ Wild übersehen / spät erkannt
- ☐ Sonstiges Objekt übersehen / spät erkannt
- ☒ Straßenverlauf falsch eingeschätzt

3. Ist es zu einem Unfall gekommen? [A311]

Bitte nur ausfüllen, wenn Sie durch Blendung in eine gefährliche Situation geraten sind.

☐ Ja
 ☐ Nein

4. Falls es zu einem Unfall gekommen ist: Welche Art Unfall war es? [A313]

Falls es zu keinem Unfall kam, bitte nichts ankreuzen.

☐ Mit Sachschaden
 ☐ Mit Personenschaden
 ☐ Mit Personen- und Sachschaden
 ☐ Mit Wildschaden
 ☐ Mit Wild- und Sachschaden
 ☐ Sonstiges

5. Welche Farben assoziieren Sie am ehesten mit Blendung? [A303]

Bitte sortieren Sie die folgenden Farben in absteigender Reihenfolge, beginnend mit der Farbe mit der Sie am ehesten Blendung assoziieren. Hierfür ziehen Sie die rechteckigen Kästen auf der linken Seite mit der Maus zu den entsprechenden Zahlenfeldern auf der rechten Seite.

Rot	Grün	1
Blau	Gelb	2
		3
		4

6. Was passiert mit Ihnen, wenn Sie durch andere Verkehrsteilnehmer geblendet werden? [A316]

Bitte ordnen Sie die Kästchen in absteigender Reihenfolge, beginnend mit dem das für Sie den größten Einfluß hat. Bitte ziehen Sie hierfür das jeweilige Kästchen links auf ein Nummernfeld rechts.

Ich fühle mich unwohl	Ich kann Objekte schlecht erkennen	1
Ich werde schneller müde	Ich werde vom Verkehrsgeschehen abgelenkt	2
		3
		4

7. Wie häufig fühlen Sie sich geblendet? [A330]

Falls Sie kein LKW oder sonstiges fahren, dann können Sie den entsprechenden Regler in der Ausgangsstellung belassen.

Als Autofahrer?	<input checked="" type="radio"/>	nie never	selten rarely	manchmal sometimes	oft often	immer always
Als LKW-Fahrer?	<input type="radio"/>	nie never	selten rarely	manchmal sometimes	oft often	immer always
Als Motorradfahrer?	<input checked="" type="radio"/>	nie never	selten rarely	manchmal sometimes	oft often	immer always
Als Fußgänger?	<input type="radio"/>	nie never	selten rarely	manchmal sometimes	oft often	immer always
Als Fahrradfahrer?	<input type="radio"/>	nie never	selten rarely	manchmal sometimes	oft often	immer always

Weiter

[Bastian Zydek](#), [Fachgebiet Lichttechnik](#), [Technische Universität Darmstadt](#) - 2013

Seite 7



Danke für Ihre Teilnahme!

Wir möchten uns ganz herzlich für Ihre Mithilfe bedanken.

[Bastian Zydek](#), [Fachgebiet Lichttechnik](#), [Technische Universität Darmstadt](#) - 2013

Veröffentlichungen und betreute Arbeiten

Patentanmeldungen

Zydek, Bastian; Sanchez, Vanesa; Reiss, Benoît: Method and device for controlling a light beam emitted by a vehicle, in particular an automobile, EP2479064, Prioritätsdatum 21.01.2011

Fachartikel

Zydek, Bastian; Schiller, Christoph; Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc: Bewertung von Scheinwerfern mit blendfreiem Fernlicht, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 6/2014

Sprute, Jan Holger ; Söllner, Stefan ; Haferkemper, Nils ; Schiller, Christoph ; Zydek, Bastian ; Khanh, Tran Quoc: Investigations on Glare Impact at Long Distances, Light & Engineering, 18 (2) pp. 33-38. ISSN 0236-2945, 2010

Konferenzbeiträge

Zydek, Bastian; Schiller, Christoph; Wagner, Max; Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc: Performance Evaluation of Vehicles with Adaptive Headlamp Systems, ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, 2013

Zydek, Bastian; Haferkemper, Nils; Khanh, Tran Quoc: Klettwitz Levelling Test: Analysis of Photometric Data and Comprehension, ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, 2013

Kosmas, Kyriakos; Zydek, Bastian; Zydek, Simon; Khanh, Tran Quoc: Device for Aiming of Automotive Headlamps under Adverse Conditions, Lux junior, 2013

Kosmas, Kyriakos; Zydek, Bastian; Zydek, Simon; Khanh, Tran Quoc: Device for Aiming of Automotive Headlamps under Adverse Conditions, ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, 2013

Langkabel, Frank; Zydek, Bastian; Eckert, Heiko; Bartl, Colja; Khanh, Tran Quoc: Evaluation of Headlamp Systems on a Customer Point of View, ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, 2013

Zydek, Bastian; Bodrogi, Peter; Khanh, Tran Quoc: A new concept of disability glare under traffic lighting conditions: experimental set-up, results and analysis of spectral sensitivity, ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, 2011

Sprute, Jan Holger; Söllner, Stefan; Haferkemper, Nils; Schiller, Christoph; Zydek, Bastian; Khanh, Tran Quoc: Dynamic Glare Assessment – Defining Undue Glare in Night-time Driving, ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, 2011

Sprute, Jan Holger; Söllner, Stefan; Haferkemper, Nils; Schiller, Christoph; Zydek, Bastian; Khanh, Tran Quoc: Investigations on Glare Impact at Long Distances, ISAL – International Symposium on Automotive Lighting, 2009

Betreute Arbeiten

Kobbert, Jonas: Proposal zur Masterarbeit: Auswahl, Aufbau und Charakterisierung eines Eye-Tracking Systems für die Optimierung von Kfz-Scheinwerfern, Technische Universität Darmstadt, 2014

Dechant, Moritz: Masterarbeit: Entwicklung eines adaptiven Kurvenlichtes für Motorräder auf Basis diskreter statischer Lichtsektoren, Technische Universität Darmstadt, 2014

Kosmas, Kyriakos: Fachpraktikum: Validierung von photometrischen Messungen anhand von Simulationen mit Lichtstärkeverteilungskörpern, Technische Universität Darmstadt, 2014

Bartl, Colja: Bachelorarbeit: Bewertung von Kurvenlicht und Auswahl von LED-Zusatzmodulen auf Basis des Fahrerblickverhaltens, Hochschule Darmstadt, 2014

Kosmas, Kyriakos: Bachelorarbeit: Entwicklung eines Gerätes zur Einstellung der Lage der Lichtstärkeverteilung von Kfz Scheinwerfern, Technische Universität Darmstadt, 2013

Bartl, Colja: Berufspraktisches Semester: Sicherheitsgewinn adaptiver Scheinwerfersysteme, Hochschule Darmstadt, 2013

Gutmann, Florian: Diplomarbeit: Entwurf, Aufbau und Validierung eines Versuchsstandes zur Untersuchung des spektralen Blend- und Detektionsverhaltens unter Straßenverkehrsbedingungen, Technische Universität Darmstadt, 2012

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

Erklärung laut §9 der Promotionsordnung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation allein und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur verfasst habe.

Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Bad Soden, den 21. Juli 2014

Bastian Walter Zydek